



EESTI MAAÜLIKOOL  
Metsandus- ja maaehitusinstituut

**Ivar Turja**

**KLAASPLASTSARRUSEGA BETOONTALADE  
PAINDETÕMBETUGEVUSE TULEKAHJUJÄRGNE  
UURIMINE**

**INVESTIGATION OF FLEXURAL STRENGTH OF POST FIRE  
CONCRETE BEAMS REINFORCED WITH GLASS FIBRE  
POLYMER BARS**

Magistritöö  
Maaehituse õppekava

Juhendaja: dotsent Alexander Ryabchikov, *PhD*

Tartu 2018

Eesti Maaülikool		Magistritöö lühikokkuvõte	
Kreutzwaldi 1, Tartu 51006			
Autor: Ivar Turja		Õppekava: Maaehitus (382)	
Pealkiri: Klaasplastsarrusega betoontalade paindetõmbetugevuse tulekahjujärgne uurimine			
Lehekülgi: 72	Jooniseid: 28	Tabeleid: 7	Lisasid: 16
Osakond / Õppetool:		Maaehituse ja veemajanduse õppetool	
ETIS-e teadusvaldkond ja CERC S-i kood:		Tehnikateadused: T220, T230	
Juhendaja(d):		dotsent Alexander Ryabchikov	
Kaitsmiskoht ja -aasta:		Tartu 2018	
<p>Raudbetoon on maailmas laialt levinud materjal, kuid armeerimiseks kasutatava terase puuduseks on selle korrodeerumine. Terassarruse asemel kasutatakse polümeerkiudsarruseid betoonkonstruktsioonides, mis puutuvad kokku agressiivse keskkonna, erinevate kloriidide ja hapetega. Kuna polümeerkiudsarrused võrreldes terassarrustega on suhteliselt uus materjal, siis sellest konstruktsioonide projekteerimiseks leidub vähe standardeid ja eeskirju. Sealhulgas on vähe uuritud materjali tulepüsivust ja seega ei ole soovitatud seda kasutada konstruktsioonides, kus tulepüsivuse nõue on tähtis.</p> <p>Käesoleva magistritöö eesmärgiks on võrrelda klaasplastsarrustega armeeritud talade tulekahjujärgsete ja kuumutamata katsekehade läbipainet ning paindetõmbetugevust. Valmistati seitse erinevat katseseeriat, kus igas seerias oli viis katsekeha ehk kokku 35 tükki. Seeriad erinesid kasutatava sarruse läbimõõdu ja valitud betooni kaitsekihi paksuse poolest. Katsekehade valmistamiseks kasutati armeeringuna klaasplastsarrust Armastek AKC 6, -8 ja -10 ning betooni survetugevusklassiga C35/45. Katsekehade kuumutamiseks kasutati propaanipõletit ja katseid viidi läbi välitingimustes. Talade paindetõmbetugevuse määramiseks sooritati nelja punkti paindetõmbekatse katsemasinaga „ЗІМ ІІ-125“, mille käigus fikseeriti jõu ja läbipainde väärtused kuni kolme millimeetrini ning lubatud piiril.</p> <p>Kõigi katsekehade kuumutamisejärgsel vaatlusel selgus, et tekkinud olid esialgsed praod, mis hiljem paindekatsel arenesid kuni katsekeha purunemiseni. Katsekehad purunesid põhiliselt kahel viisil – painde mõjul keskelt või põikjõu tõttu toe kohalt. Katsetulemused näitasid, et tulekahju suurendab oluliselt talade läbipainet, saavutades lubatud väärtuse väiksema koormuse juures. Kuid samas oli paindetõmbetugevus purunemisel võrdväärne kuumutamata talade paindetõmbetugevusega. Antud materjali täiendav katsetamine ja uurimine vastavalt kehtivatele tulepüsivuse standarditele on vajalik.</p>			
Märksõnad: tulepüsivus, nelja punkti paindetõmbekatse, betoon, klaasplastsarrus, läbipaine			

Estonian University of Life Sciences Kreutzwaldi 1, Tartu 51006		Abstract of Master's Professional Higher Education Thesis	
Author: Ivar Turja		Curriculum: Civil Engineering (Rural Building), 382	
Title: Investigation of flexural strength of post fire concrete beams reinforced with glass fibre polymer bars			
Pages: 72	Figures: 28	Tables: 7	Appendixes: 16
Department / Chair:		Chair of Rural Building and Water Management	
Field of research and (CERC S) code:		Technological Sciences: T220, T230	
Supervisor:		Associate Professor Alexander Ryabchikov	
Place and date:		Tartu 2018	
<p>Reinforced concrete is a widely used material in the world but the problem with the steel used for reinforcement lies in its corrosion. Instead of these, polymer fibre bars are used in the concrete constructions that have contact with aggressive environment, different chlorides and acids. Since glass fibre polymer bars are relatively new in comparison with steel reinforcements, there are very few standards and regulations for engineering these constructions. Also, the fire resistance of the material has been slightly examined and therefore it is not recommended to use it in the constructions where fire resistance requirement is very important.</p> <p>The aim of this master's thesis is to compare the deflection and flexural strength of the post fire concrete beams reinforced with glass fibre polymer bars and the unheated test pieces. Seven different test series were prepared, where there were five test pieces in each, meaning 35 pieces in total. The series varied in the diameter of the used bars and in the thickness of the concrete protective layer. Glass fibre polymer bars <i>Armastek AKC 6, -8 and -10</i> were applied for reinforcement and the concrete with the compressive strength class of C35/45 were used for production of specimens. The specimens were heated with the propane torch in field conditions. Four-point flexural tensile test with the test machine <i>3HM II-125</i> was carried out to find the flexural strength of the beams. During the test, the force and deflection were recorded to the deflection of three millimeters and force value was determined at allowable deflection.</p> <p>While observing the specimens after fire test, it occurred that the first cracks that had initiated in the fire test developed until its fracture in flexural test. The specimens fractured mainly in two ways – in the middle due to bending moment or beside the support due to shear forces. Test results showed that the fire increases sufficiently the deflection of the beams, it also attains the allowable deflection at lower force. However, the flexural strength was equal compared to corresponding values of unheated beams. It is necessary to investigate this material according to valid standard for fire resistance test.</p>			
Keywords: fire test, four-point flexural test, concrete, glass fiber polymer bar, deflection			

# Sisukord

SISSEJUHATUS .....	6
1. KIRJANDUSE ÜLEVAADE .....	8
1.1. Polümeerkiudsarruse ajalugu .....	8
1.2. Polümeerkiudsarrus .....	9
1.2.1. Polümeerkiudsarruse ehitus .....	9
1.2.2. Kiudmaterjalid .....	10
1.2.3. Sidusaine .....	12
1.3. Polümeerkiudsarruse tootmine .....	14
1.4. Varem läbiviidud tulepüsivuskatsed polümeerkiudsarrustega .....	16
1.5. Klaasplastsarrus Armastek .....	18
1.6. Näiteid polümeerkiudsarruse kasutamisest betoonkonstruktsioonides .....	21
1.7. Magistritöö eesmärgid ja ülesanded .....	25
2. KLAASPLASTSARRUSEGA BETOONTALADE PAINDETÕMBETUGEVUSE TULEKAHJUJÄRGNE UURIMINE .....	27
2.1. Katsekehad .....	27
2.2. Kuumutamine .....	29
2.3. Paindekatsed .....	31
3. KATSETULEMUSED JA ANALÜÜS .....	36
3.1. Paindetõmbetugevus lubatud läbipainde puhul .....	41
3.2. Paindetõmbetugevus purunemisel .....	43
KOKKUVÕTE .....	46
KASUTATUD KIRJANDUS .....	50
LISAD .....	53
Lisa 1. Katseseeriad .....	54
Lisa 2. Katsekehade valmistamine ja hoiustamine .....	55
Lisa 3. Katsekehade mõõtmised .....	57
Lisa 4. Valmistamise etappide, katsetamiste kuupäevad ja kuumutamiskatse tulemused .....	60
Lisa 5. Peamised esinenud purunemispildid .....	61
Lisa 6. Kuumutatud katsekehade katseprotokollid .....	62
Lisa 7. Kuumutamata katsekehade katseprotokollid .....	63
Lisa 9. Esimese katseseeria purunemise ja läbipainde T-Test .....	65
Lisa 10. Teise katseseeria purunemise ja läbipainde T-Test .....	66
Lisa 11. Kolmanda katseseeria purunemise ja läbipainde T-Test .....	67

Lisa 12. Neljanda katseseeria purunemise ja läbipainde T-Test .....	68
Lisa 13. Viienda katseseeria purunemise ja läbipainde T-Test .....	69
Lisa 14. Kuuenda katseseeria purunemise ja läbipainde T-Test .....	70
Lisa 15. Seitsmenda katseseeria purunemise ja läbipainde T-Test .....	71
Lisa 16. Lihtlitsents lõputöö salvestamiseks ja üldsusele kättesaadavaks tegemiseks ning juhendaja kinnitus lõputöö kaitsmisele lubamise kohta .....	72

## SISSEJUHATUS

Tänapäeval moodustavad ehituses püstitavatest hoonetest üsna suure osakaalu betoonkonstruktsioonid. Selle laia leviku peamine põhjus peitub materjali suures survetugevuses. Betooni puudusteks on madal painde- ja tõmbetugevus. Nende omaduste parandamiseks valmistatakse komposiitkonstruktsioone, kus traditsiooniliselt on armeeringuna kasutusel terassarrused. Selline kahest materjalist koosnev komposiit võeti kasutusele 1800. aastate keskpaigas. 20. sajandi lõpupoole tekkis vajadus uute materjalide järgi, kuna valminud konstruktsioonides hakkasid levima terassarruse korrosiooniprobleemid ja uudsed tehnoloogiad vajasisid mittemagneetilist armeeringut. Peamised rajatised, kus probleemid esinema hakkasid, asusid merelises keskkonnas või teedel, millel jäätõrjeks kasutatakse soola. Korrosiooniprobleemile leiti küll lahendus selle võõpamisel erinevate ainetega ja betoonkaitsekihi suurendamisega, kuid need tõstsid ehituse maksumust ja selle omakaalu. Uue materjalina nähti head võimalust polümeerkiudsarrustes – enimlevinud on klaaskiudsarrus oma madala hinna ja lihtsa tootmisprotsessi poolest.

Klaaskiudsarrus on komposiitmaterjal, mille valmistamiseks kasutatakse klaaskiudusid ja sidusainet. Antud materjali eelised terassarruse ees on väike mahukaal, korrosioonikindlus, mittemagneetilisus ja suur tõmbetugevus. Kuna materjali on veel suhteliselt vähe uuritud, siis selle kasutamise levik on väike – peamised kasutusala Eestis on hoonete vundamendid ja põrandad. Mujal konstruktsioonides on materjal veel vähelevinud, sest see ei kannata kõrgeid temperatuure ja selle materjaliga konstruktsioonides esinevad suuremad läbipained. Kuna seoses tulekahjuolukordadega on materjali veel vähe uuritud, ei kasutata seda kohtades, kus tulepüsivusklass on tähtsaks projekteerimisnõudeks.

Kuna on teada, et klaaskiudsarrused ei kannata sama kõrgeid temperatuure kui teras, siis tekkis soov uurida klaaskiudsarrustega armeeritud talasid, mis on üle elanud tulekahjuolukorra. Katsetusteks valmistati seitse erinevat seeriat klaaskiudsarrusega Armastek armeeritud katsekehasid, mis erinesid teineteisest betoonkaitsekihi suuruse ja armeerimisskeemi poolest. Tulekahjuolukorra imiteerimiseks valmistati katseahi ja kuumutati talasid välitingimustes.

Käesoleva magistritöö eesmärgiks on eksperimentaalselt uurida klaaskiudsarrusega Armastek armeeritud talade läbipainet ning paindekandevõimet tulekahjujärgselt ja saadud tulemusi analüüsida. Katsetulemusi võrreldi Henry Maaski magistritöö tulemustega, kus katsetati paindele identseid kuumutamata talasid.

Lähtuvalt töö eesmärkidest püstitati järgmised hüpoteesid:

- 1) tulekahjujärgselt saavutab tala lubatud läbipainde väiksema paindekandevõimega kui kuumutamata talade puhul;
- 2) tulekahjujärgselt on talade paindekandevõime madalam kui kuumutamata talade puhul.

Magistritöö esimeses peatükis antakse ülevaade polümeerkiudsarruse ajaloost, koostisest, tootmisest, omadustest ning tuuakse näiteid objektidest, kus seda on kasutatud.

Teises peatükis kirjeldatakse katsemetoodikat ja katse käiku klaasplastsarrusega betoontalade paindetõmbetugevuse tulekahjujärgseks uurimiseks. Katsemetoodika on välja töötatud töö autori poolt uuritud kirjandusele toetudes.

Kolmandas peatükis esitatakse katse tulemusi, analüüsitakse ning võrreldakse Henry Maaski saadud tulemustega.

Magistritöö autor tänab:

- 1) OÜ Donleon, mis tagas katseteks vajaliku koguse klaasplastsarrusega Armastek;
- 2) OÜ TMB Element katsekehade valmistamiseks vajalike materjalidega ja ruumidega varustamise eest;
- 3) AS Tesmanit kuumutamiskatsete läbiviimiseks vajalike vahenditega varustamise eest.

# 1. KIRJANDUSE ÜLEVAADE

## 1.1. Polümeerkiudsarruse ajalugu

Esimene teadaolev terase ja betooni komposiitkonstruktsiooni kasutus jääb 19. sajandi keskpaika, kui Prantsuse tööstur F. Coignet ehitas 1853. aastal Pariisi äärelinna elamu, mis on püsti ka tänapäeval. Kuna veel 19. sajandil puudusid käsiraamatud, mille abil raudbetoonist komposiitkonstruktsioone valmistada, siis hakati neid laialdasemalt valmistama 20. sajandi alguses (History of Reinforced... 2011). Raudbetooni suurimaks probleemiks on terassarruste korrodeerumine ja selle peamisteks põhjustajateks on jäätõrjeks kasutatavad ja ka merevees leiduvad soolad (Barros jt 2012).

1940ndatel hakati esmakordselt teede jäätõrjeks kivisoola kasutama ja esimene linn, kus see toimus oli Detroit, kuna selle all oli kohalik soolakaevandus (Howard 2014). 1960ndatel avastati korrosiooniprobleemid erinevatel raudbetoonkonstruktsioonidel, mis puutusid kokku mitmesuguste soolade ja kloriididega. Kloriidide tungimisel betooni kaotab betoon enda aluselised omadused ja happeline keskkond soodustab sarruste korrodeerumist. Kuna selliste konstruktsioonide hoolduskulud on küllaltki suured, siis hakati otsima alternatiivseid lahendusi. Probleemi lahendamiseks katsetati näiteks terase galvaniseerimist, sarruste katmist epoksüüdvaiguga ning polümeerkiudsarruste kasutamist. Katsetustest järeldati, et parim lahendus on katta agressiivsetes keskkondades sarrused vaiguga ja seejuures ei peetud polümeerkiudsarrust jätkusuutlikuks lahenduseks (ACI 440.1R-15 2015).

Kuna polümeerbetoon ja terassarrused ei sobi omavahel termiliste omaduste poolest, siis kaaluti alternatiivina terase asemel polümeerkiudsarruseid. 1960ndate lõpul alustas polümeerkiudsarruste tootmisega Marshall-Vega Corporation (ACI 440R-96 2002). Kuigi esialgu ei võetud materjali omaks, leiti selle väärtus 1970ndate lõpus, kui avastati materjali eelised vaiguga kaetud terassarruste ees (ACI 440R-96 2002). Tabelis 1.1 on välja toodud polümeerkiudsarruse peamised puudused ja eelised võrreldes terassarrusega.



**Tabel 1.1.** Polümeerkiudsarruse puudused ja eelised võrreldes terrassarrusega (\*ACI 440.1R-06 2006 ref Timma 2016)

<b>Puudused</b>	<b>Eelised</b>
Madal elastsusmoodul	Mittermagneetiline
Ei kannata kõrget temperatuuri	Suur tõmbetugevus
Ei veni enne purunemist	Kerge, umbes 1/5 terase tihedusest
Madal põikitugevus	Ei korrodeeru
Päikesekiirguse mõju polümeeridele	Kõrge väsimustugevus
Madal vastupidavus leeliselises keskkonnas	Väike elektrijuhtivus
Kõrge joonpaisumise tegur	

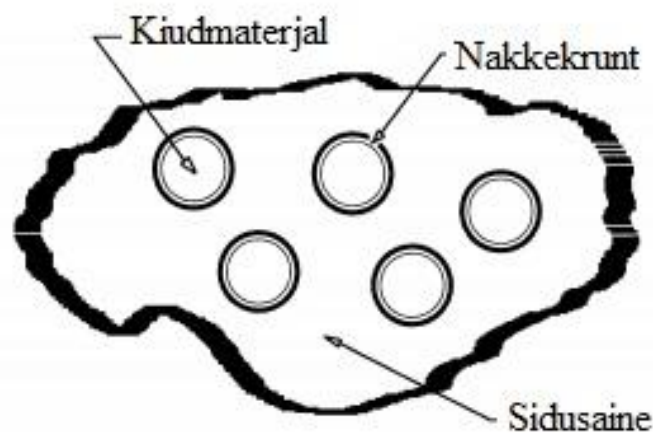
Kuna materjalil on mõned tugevad küljed, siis hakati seda kasutama 1980ndatel agressiivsetes keskkondades ja erilahendusi nõudvates kohtades. Tänu korrosioonikindlusele võimaldab polümeerkiudsarrus ehitistele ja rajatistele pikemat eluiga kohtades, kus betoon puutub kokku sooladega, näiteks sadamakaid, teed ja sillad – kohad, kus talvel tehakse jäätõrjet. Laialdaselt hakati seda kasutama meditsiinivaldkonnas magnetresonantstomograafi ruume ümbritsevas betoonis (Burgoyne jt 2007) ja seda kasutatakse tänaseni. Lisaks on materjal rakendusel elektri- ja reaktorseadmete vundamentides, magnetraudteede konstruktsioonides, radarijaamades ja lennujaama hoovõturadadel (ACI 440.1R-15 2015). Esimene polümeerkiudsarrusest armeeringuga sild valmis 1986. aastal Saksamaal ja alates sellest hetkest on hakatud sildade armeerimisel üle maailma kasutama rohkem polümeerkiudsarrust (ACI 440R-96 2002).

## **1.2. Polümeerkiudsarrus**

### **1.2.1. Polümeerkiudsarruse ehitus**

Polümeerkiudsarrus on komposiitmaterjal, mille koostisosadeks on kiudmaterjal ja selle vahel paiknev sidusaine. Polümeerkiudsarruse koostis on kujutatud joonisel 1.1 (ACI 440R-96 2002). Sarruste üheks komponendiks olev kiudmaterjal annab tugevuse ja jäikuse ning teiseks komponendiks olev sidusaine annab jäikuse ja keskkonnakaitse. Selleks, et materjal saavutaks talle omased lõplikud omadused, peab kiudmaterjal olema täielikult kaetud sidusainega (Tuakta 2005). Polümeerkiudsarrus on loomult anisotroopne, millest tuleneb, et materjal reageerib erinevalt piki- ja põikisuunalistele jõududele. Kahe materjali

erinevus tuleb välja juhul kui võrrelda antud materjali terasega, sest terasel jäävad olenemata jõu mõjumise suunast tugevusomadused samaks (ACI 440.1R-15 2015). Et tagada sarruste tõmbetugevus ja jäikus tõmbel, kasutatakse suure tõmbetugevuse ja elastsusmooduliga pidevaid kiude. Erinevate sarruste tootjate kiudmaterjali ja sidusainete omavaheline suhe võib kõikuda üsna suurtes piirides, kuid kiudmaterjali maht peaks jääma vahemikku 30% kuni 75%. Ainete omavaheline suhe sõltub kasutatavate kiud- ja sidusaine tüübist ning ka valmistatava varda läbimõõdust (Balaguru jt 2009).



**Joonis 1.1.** Polümeerkiudsarruse struktuur (ACI 440R-96 2002).

### 1.2.2. Kiudmaterjalid

Kõige rohkem kasutatakse ehitusel polümeerkiudsarruste valmistamiseks järgmiseid kiudaineid: klaas-, süsinik- ja aramiidkiud. Antud uurimustöös lähema vaatluse all olev klaaskiud jaguneb veel neljaks liigiks: elektriline klaas (E-klaas), struktuurne klaas (S-klaas), keemiline klaas (C-klaas) ja leeliskindel klaas (AR-klaas). Neist kahest on enamlevinud elektriline ja struktuurne klaas. Kõige suuremat kasutust on leidnud elektriline klaas, mida kasutatakse ligi 90% kõigist klaasplastarmeeeringutega konstruktsioonide puhul, sest võrreldes teistega on tal head tugevusnäitajad ning optimaalne hind. Keemiline klaas on kasutusel suure korrosiooniohuga toodete puhul kemikaali- ja veetorudes ning kemikaali- ja veehoidlates. Leeliskindel klaas töötati välja

kasutamiseks kõrgema tasemega aluselistes keskkondades. Tüüpiliste klaaskiuliikide tehnilised andmed on välja toodud tabelis 1.2. (Balaguru jt 2009)

**Tabel 1.2.** Erinevate klaaskiuliikide tehnilised andmed (Balaguru jt 2009)

Kiu tüüp	Tihedus g/cm <sup>3</sup>	Tõmbetugevus MPa	Elastsusmoodul GPa	Dielektriline läbivus 1Hz/22°C	Venivus %
E-klaas	2,60	3445	72,4	6,33	4,8
S-klaas	2,49	4585	86,9	5,34	5,4
C-klaas	2,56	3310	68,9	6,90	4,8
AR-klaas	2,7	3241	73,1	8,10	4,4

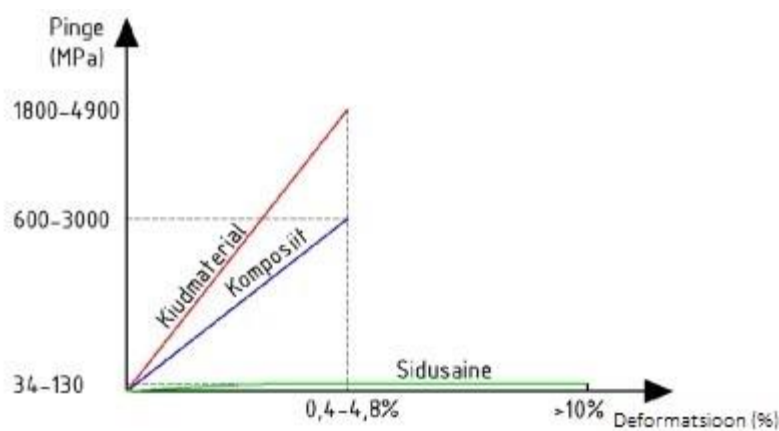
Kõige suurema elastsusmooduliga polümeerkiud on süsinikkiud (Balaguru jt 2009). Nendel on suur elastsusmooduli/kaalu ja tõmbejõu/kaalu suhe. Lisaks on süsinikkiul kõrge väsimustugevus ja madal soojuspaisumine ning mõnel juhul isegi negatiivne soojuspaisumine. Tänu sellele omadusele on materjalil tagatud ligi nullilähedane paisumine kuni 300 °C juures. Kui kiudusid kaitsta oksüdeerumise eest, kannataks materjal kuni 2000 °C. Materjali negatiivseteks külgedeks on kõrge hind ja väike löögikindlus. Süsinikkiudu toodetakse maailmas elastsusmooduliga 207 kuni 1035 GPa.

Aramiidkiud (Balaguru jt 2009), mis saadakse kiu leotamisega keemilises segus, on sünteetiline orgaaniline polümeerkiud. See kuld kollaka värvusega kiud on tuntud Kevlar® ning polümeerkiudsarruseid toodetakse Kevlar®49st. Võrreldes teiste komposiitmaterjalides kasutatavate kiududega on aramiidkiud madalama tihedusega ja kõrgema tõmbetugevuse/kaalu suhtega. Aramiidkiud on ligikaudu 20% kergemad enamikest süsinikkiududest ja 43% kergemad kui klaaskiud. Lisaks kiu suurele tõmbetugevusele on tal hea vastupanu muljumisele ja hõõrdejõule ning ka keemilisele ja termilisele lagunemisele. Põhilisteks negatiivseteks omadusteks on madal survetugevus, lagunemine kokkupuutel ultraviolettkiirgusega ning keeruline töötlemine ja lõikamine, mis nõuavad eriseadmeid.

### 1.2.3. Sidusaine

Sidusaine ehk vaik koosneb polümeeri molekulidest ja need omakorda lihtsamatest ja väiksematest monomeeridest. Ilma sidusaineta ei püsi kiud omavahel koos. Selleks, et kiud kannaksid maksimaalset koormust, peab vaigul olema suurem venivus ja madalam elastsusmoodul kui kiududel, mis on näidatud ka joonisel 1.2. Sidusaine ülesanneteks polümeerkiudsarrustes on (Tuakta 2005):

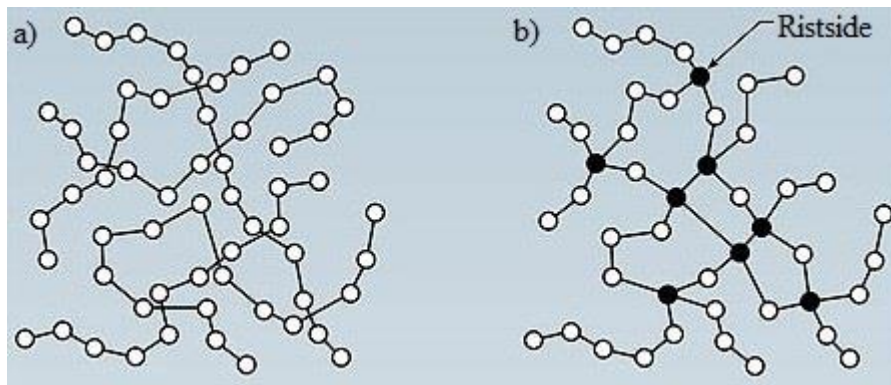
- siduda kiud kokku ja kanda jõud üle kiududele nakke ja hõõrdumise teel;
- tagada materjali kuju ja jäikus;
- eraldada kiud teineteisest, nii et need hakkaksid eraldi tööle, aeglustades või takistades sellega pragude levikut;
- kaitsta kiude keemiliste ja mehhaaniliste vigastuste eest;
- parandada komposiidi töödeldavust ja löögikindlust;
- anda materjalile värvus ja pinnaviimistlus.



**Joonis 1.2.** Polümeerkiudsarruse komponentide tõmbediagrammid (\*Newhook, Svecova 2007 ref Jõgi 2014).

Komposiidi lõpliku tugevuse määravad kiudude kvaliteet, suund, kuju ning mahu ja vaigu suhe, vaigu ja kiu omavaheline nake ja tootmisprotsess. Tootmisprotsess on sarruste valmimisel üks tähtsamaid, sest kasutades tootmises kogu aeg samasuguseid koguseid, võib mõnigi väike muudatus mõjutada kvaliteeti. Lisaks on tootes veel erinevaid lisandeid vahemikus 10-20%, mis kõik mõjutavad polümeerkiudsarruste omadusi (Newhook, Svecova 2007). Arvestades tootmismeetodeid ja materjali omadusi, eristatakse kahte liiki

sidusaeineid – termoplastne ja termokõvenev. Kahe vaigu koostise erinevus on kujutatud joonisel 1.3.



**Joonis 1.3.** Ristsidemeteta termoplastne vaik (a) ning ristsidemetega termokõvenev vaik (b) (Thermoplastics vs... 2018).

Termoplastsed polümeerid (Tuakta 2005) on loomult termokõvenevast polümeerist plastsemad ja vastupidavamad, kuid madalama jäikuse ja tugevusega. Neid kuumutades on võimalik materjali suhteliselt hõlpsalt töödelda ja kuju muuta. Erinevalt termokõvenevatest vaigudest ei moodusta termoplastse materjali molekulid ristseotisi, seega termoplastne polümeer on elastne ja töödeldav. Termoplastse materjali negatiivne pool on see, et ta on kõrgel temperatuuril madala roomekindlusega ning tundlikum enamike lahustite suhtes. Enimkasutatavad termoplastid on nailon, polüpropüleen (PP), polüeteereeterketoon (PEEK) ja polüfenüleensulfiid (PPS).

Termokõvenevad vaigud (Tuakta 2005) valmistatakse enamasti vedelast või pooltahkest materjalist. Neid vaike kõvendatakse erinevate keemiliste reaktsioonidega nagu polükondensatsioon, polümeerisatsioon ja kuivatamine. Nende protsesside tulemuseks on kõva ja tahke materjal, mida erinevalt termoplastsetest materjalidest pole võimalik peale jäigastumist enam sulatada või saavutatud kuju muuta. Termokõvenev materjal on tavaliselt habras, omab väiksemat joonpaisumist ning elektrijuhtivust ja suuremat vastupanu aluselises ja happelises keskkonnas. Laialdasemalt levinud termokõvenevad vaigud on epoksüüdid, polüestrid, vinüülestrid, fenoolid, tsüanaatestrid, bismaleimiidid ja polüimiidid.

### 1.3. Polümeerkiudsarruse tootmine

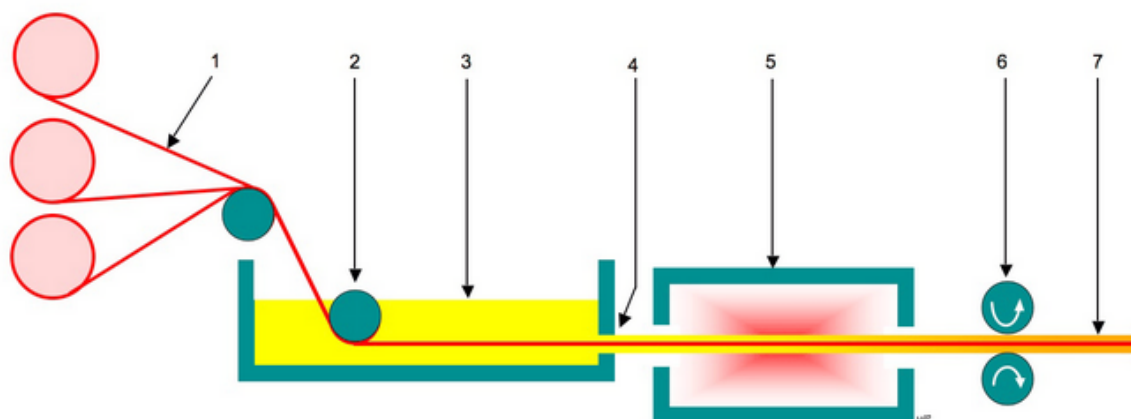
Polümeerkiust toodete valmistamiseks on levinud kolm meetodit, milleks on: pultrusioon, kiu punumine ja mähkimine ehk põimimine (ACI 440.1R-15 2015).

Polümeerkiudsarruste tootmiseks kasutatakse pultrusiooniprotsessi, millega on võimalik toota lõpmata pikkusega ja kogu ulatuses ühtlase ristlõikega tooteid. Saadavate sarruste pikkus sõltub vaid kasutatavate kiudude pikkusest. Joonisel 1.4 on kujutatud erinevaid võimalikke tooteid, mida saab valmistada pultrusioonitehnoloogiaga.



**Joonis 1.4.** Pultrusioonitehnoloogiaga valmistatud erinevad profiilid (FRP / GRP... 2018).

Pultrusiooniprotsess (The pultrusion... 2018) seisneb vaiguga immutatud lõpmata pikkade kiudude tõmbamises läbi matriitsi. Matriits annab profiilile kuju ja selles kõvastub ka vaik. Matriitsi lõpus või sellest väljumisel jahutatakse detaili vastavalt vajadusele. Valmistatav toode peab enne tõmbemehhanismi piisavalt kõvenema, et pidada vastu rakendatavale tõmbejõule. Pultrusiooni tootmisprotsess on kujutatud joonisel 1.5.



**Joonis 1.5.** Pultrusiooni tootmisprotsess (Pultrusion 2018): 1 - algne kiudmaterjal ja selle põimimine, 2 - pingutus rullik, 3 - leotamine sideainega, 4 - sideainega leotatud kiud, 5 - kuju ja värvuse andmine ning kuumutamine, 6 - tõmbemehhanism, 7 - lõplikult tahenenud komposiitsarrus.

Pultrusioonitehnika (Valmistustehnoloogia 2018) polümeerkiudsarruse tootmine saab alguse lõpmata pikkade kiudude rullidest; kiudude arv sarruses sõltub valmistatava sarruse ristlõike pindalast ja soovitud tugevusest. Kõigepealt tõmmatakse kiud läbi vaiguga täidetud vannist, mis seejärel vormitakse ja kuumutatakse valmistooteks. Tootmise lõplik etapp on sarruse jahutamine ja nende järkamine ettenähtud mõõtu. Järgnevas tabelis on esitatud pultrusioonimeetodil toodete valmistamise eelised ja puudused.

**Tabel 1.3.** Pultrusioonimeetodil toodete valmistamise eelised ja puudused (Valmistustehnoloogia 2018)

Eelised	Puudused
Head mehaanilised omadused, eriti telgsuunas	Ilma eriarmatuurita on ristisuunaline tugevus madal
Mõõdukas toote hind	Matriitsi kõrge maksumus (võrreldes näiteks alumiiniumprofiili tootmiseks vajaliku matriitsiga)
Suur tootlikkus	Ühe matriitsiga on võimalik toota vaid ühte ristlõikega toodet
Võimalik valmistada väga erineva ristlõike kujuga tooteid	

## **1.4. Varem läbiviidud tulepüsivuskatsed polümeerkiudsarrustega**

Antud peatükis käsitletakse varem läbiviidud uurimustöid seoses polümeerkiudsarruste käitumisega tulekahjuolukorras. Kuna materjal pole veel väga laialt levinud, siis on seda ka tulekahjuolukorras suhteliselt vähe uuritud. Kirjandusest leiti uurimustöid, kus katsetati paneele ja ka talasid. Kõrged temperatuurid mõjuvad polümeerkiudsarrustele suhteliselt halvasti ja seetõttu tuleb erilist tähelepanu pöörata just nendele konstruktsioonidele, mille oluliseks projekteerimisnõudeks on tulepüsivus (Newhook, Svecova 2007). Kuigi polümeerkiudsarrus ei saa süttida betooni väikese hapnikusisalduse tõttu, hakkab tihti sulama just sarruse koostises olev vaik. Temperatuuri, mille puhul vaik sulama hakkab, nimetatakse üleminekutemperatuuriks.

Kõrgemate temperatuuride tõttu hakkab sarruse sidusaine pehmenema ja selle mõjul vähenevad sarruse ja betooni omavahelised nakkeomadused. Lisaks väheneb ka klaaskiudude omavaheline nake ja hõõrdumine. Üleminekutemperatuurid kasutuspiirsesundis enamuste sidusainete puhul jäävad vahemikku 93-120 °C (ACI 440.1R-15 2015). Termoplastsete vaikude üleminekutemperatuur on madalam kui termokõvenevatel. Lisaks on sarruste kiudude sulamistemperatuurid kasutuspiirsesundis klaaskiul 880 °C ja süsinikkiul 1600 °C (ACI 440.1R-15 2015).

Abbasi ja Hogg (2005) uurisid erinevate tootjate klaaskiudsarrusega armeeritud betoontalade käitumist tulekahjuolukorras. Teras käitumine erinevatel temperatuuridel on hästi teada ning seetõttu on võimalik terasarmeeringuga konstruktsioonide projekteerimisel materjali käitumist tulekahjuolukordades ette näha. Antud töö teostati, kuna polümeerkiudsarruseid pole piisavalt uuritud ja konstruktsioonide projekteerimine tulekahjuolukordadeks on seetõttu keeruline.

Klaaskiudsarrusega armeeritud konstruktsioonide tulepüsivuse tagamiseks on lihtsaim viis suurendada betoonkaitsekihti. Uuritavas töös (Abbasi, Hogg 2005) kasutati kahe erineva tootja sarruseid ja kokku valmistati neist kolm tala, millest ühte katsetati toatemperatuuril, et saada võrdlevaid andmeid, ning teisi kuumutati ja koormati samaaegselt. Talade valmistamisel paigaldati neisse ka andurid, et jälgida temperatuuri leviku kiirust – iga katsekeha kohta oli kasutusel 23 andurit. Temperatuuri leviku kiirust mõjutavad betooni niiskusprotsent ning täitematerjal ja tsemendi keemiline koostis.



Katsekehade valmistamiseks kasutati betooni survetugevusega 42 MPa. Kasutatavate talade mõõtmeteks oli 350×400×4400 mm ja kuumutatavaid talasid koormati konstantse nelja punkti koormusega (Abbasi, Hogg 2005). Koormuse suurus valiti toatemperatuuril katsetatud tala tulemuste järgi – kuna antud talal tekkisid 60 kN juures tõmbetsoonis praod, siis valiti antud koormusest madalam ehk 40 kN. Lubatud läbipainde 17 mm saavutas tala 90 kN suuruse koormuse juures.

Kuumutamiskatsete tulemustest selgus, et esimese 30 minutiga suurenes vaikselt talade läbipaine ja peale seda olukord stabiliseerus. Uuesti algasid muutused vahemikus 75-80 minutit, kui mõlemad talad hakkasid pragunema ja praos lõi leek tugevamini põlema, arvatavasti vaigu süttimise tõttu. Talade purunemishetkeks loeti läbipainde järsku suurenemist, mis esimesel talal toimus 128 ja teisel 94 minuti möödudes (Abbasi, Hogg 2005).

Katsete lõpus oli esimese tala alumise sarruse temperatuuriks 462 °C ja teisel 377 °C, sarruste kaitsekihiks oli 80 mm. Talade purunemisel sai määravaks betooni tekkinud praod, mida mööda jõudis tuli levida sarrusteni ja sulatada seda katvat vaiku. Antud tööst saab järeldada, et minimaalne soovituslik projekteeritav betoonkaitsekiht peaks olema 70 mm, et tagada 90 minutiline tulepüsivus.

Teises vaadeldud uurimustöös sooritati tulepüsivuskatsed kahe täismõõtmes (3900×1200×200 mm) klaaskiudsarrustega armeeritud betoonpaneelil, mis on laialt levinud Kanadas parkimismajade ehitustel (Hajiloo jt 2017). Katsekehade sarruste kaitsekihiks valiti 60 mm, mis Kanada eeskirjade alusel on minimaalne kahetunnise tulepüsivusaja saavutamiseks. Katsekehade temperatuuri jälgimiseks kuumutamise protsessis paigaldati paneelidesse eelnevalt temperatuuriandurid. Paneele koormati ühtlaselt jaotatud koormusega suurusega 45 kNm, mis moodustab 55% maksimaalsest paindemomendist normaaltemperatuuril. Katsekehad pidasid vastu etteantud aja kaks tundi tulekahjuolukorras ja peale kolme tunni möödumist koormati elementi kuni purunemiseni. Üks katsekehadest purunes kui saavutati koormus 52,3 kNm, peale seda katse ka lõpetati. Katsejärgsel uuringul selgus, et sarruste kiudusid ühendav vaik oli täielikult sulanud.

Katse tulemustest tuli välja, et antud eeskirja järgi projekteeritud paneelid peavad tulekahjuolukorras vastu ettenähtud aja isegi suure varuga. Kuigi paneelide katsejärgsetel uuringutel avastati, et kui klaaskiudusid ühendav vaik oli täielikult sulanud, siis sarrused

pidasid ikkagi veel koormusele vastu (Hajiloo jt 2017). Sellest saab järeldada, et terase ja polümeerkiudsarruste puhul on projekteerimiseks vaja luua eraldi eeskirjad ja standardid, et iga materjal piisavalt efektiivselt ära kasutada.

## **1.5. Klaasplastsarrus Armastek**

Käesolevas magistritöös valmistati ja uuriti betoonist talasid, mille armeerimiseks kasutati Armastek klaasplastsarruseid. Eestis on nende toodete maaletoojaks ja edasimüüjaks OÜ Donleon, sealt on pärit ka vajalik kogus sarruseid magistritöö sooritamiseks.

Armastek on 2007. aastal Venemaal asutatud ettevõtte, mis tegeleb polümeerkiudsarruste tootmise ja arendamisega (Armastek 2018). Ettevõtte on välja arendanud enda tootmisliinid ja -meetodid ning on ka patenteerinud need koos valmistatavate toodetega. Lisaks klaasplastsarruste tootmisele valmistatakse veel basaltkiudsarruseid, liivkattega sarruseid ning tootenimekirjas on ka armeerismivõrgud. Firma peakontor asub Permi linnas, avatud on tehaseid ka Tšeljabinskis, Kaazanis, Rostovi äärelinnas ja Stropkovis Slovakkias. Ettevõtte tootmismahd on 5 miljonit meetrit sarrust kuus, sinna alla kuuluvad nii klaaskiust, basaltkiust kui ka liivkattega sarrused.

Armasteki klaasplastsarruste tootevalikus on sarrused läbimõõduga 4-40 mm ja maksimaalse pikkusega kuni 12 meetrit, kuid kuni 10 mm läbimõõduga sarruseid saab kerida kuni 50 meetri pikkustesse rullidesse (Armastek USA 2018). Sarruste tootmisel on kasutatud E-klaasist kiude ja epoksüüdvaiku. Varda maksimaalse nakke saavutamiseks on neile peale põimitud spiraalne kattekiht. Et oleks võimalik kontrollida toote kvaliteeti, on kõik rullid ja pakid sildistatud. Tootmisest tulevale materjalile kehtib garantii vaid üks aasta ja selle aja jooksul tuleb järgida hoiustamis-, transpordi- ja kasutamisenõudeid. Materjali tuleb hoiustada varjus, kuna UV-kiirgus muudab materjali nõrgemaks, kuid mitte pinnasel, et ei saaks toimuda sarruse pinna saastumine, ega temperatuuridel vahemikus -60 kuni +60 kraadi (\*Armastek Iran ref Timma 2016). Toote eeldatavaks minimaalseks elueaks on 80 aastat (Donleon 2018). Armastek poolt toodetud klaasplastsarrus on kujutatud joonisel 1.6.



**Joonis 1.6.** Erinevate läbimõõtudega klaasplastsarrus Armastek (Armastek USA 2018).

Klaasplastsarrusega Armastek töötamisel tuleks järgida järgnevaid ohutusnõudeid (\*Armastek Iran ref Timma 2016):

- Klaasplastsarrus Armastek ei erita hoiustamisel, transpordil ega paigaldamisel toksilisi aineid.
- Klaasplastsarruse käsitlemisel on vaja kasutada spetsiaalseid kindaid ja riideid, kaitseks sellest eralduvate kiudude tõttu.
- Sarruse lõikamisel tuleb kasutada respiraatorit.
- Klaasplastsarruse lahtirullimist diameetritega neli kuni kaheksa millimeetrit võib sooritada üks inimene, kuid 10 millimeetrise puhul on vaja kahte inimest.

Võrreldes terasega on Armastek klaasplastsarruse tõmbetugevus ligikaudu 2,5 korda suurem ja tiheduse poolest on uuritav materjal ka 3,8 korda väiksem (Tallinna Tehnikaülikooli Sertifitseerimisasutus 2013). Kuna klaasplastsarrusel puudub voolepiir, siis sellest valmistatud betoonist element puruneb äkiliselt, mitte nagu terasega armeeritud betoon. Klaasplastsarruse tõmbetugevusel ja elastsusmoodulil mängib suurt rolli nende läbimõõt. Terassarruse A 400 ja klaasplastsarruse Armastek omavaheline võrdlus on toodud tabelis 1.4.

**Tabel 1.4.** Klaasplastsarruse Armastek ja terassarruse A 400 võrdlus (Jõgi 2014)

Omadus	Klaasplastsarrus Armastek	Terassarrus A 400
Voolepiir MPa	0	400
Tõmbetugevus MPa	1200	590
Elastsusmoodul MPa	50000	200000
Sooja-erijuhtivus W/mK	0,35	46
Joonpaisumistegur 1/°C	$(9-12) \times 10^{-6}$	$12 \times 10^{-6}$
Tihedus kg/m <sup>3</sup>	1900	7850

Antud andmete alusel saab väita, et klaasplastsarruse Armastek ja terassarruse A 400 puhul:

- terassarruse tihedus on neli korda suurem klaasplastsarrusest,
- klaasplastsarruse tõmbetugevus on vähemalt kaks korda suurem terassarrusest,
- klaasplastsarruse elastsusmoodul on neli korda väiksem terassarruse elastsusmoodulist,
- klaasplastsarrusel puudub voolepiir.

Tallinna Tehnikaülikoolis viidi 2013. aastal läbi katseid, millega määrati klaasplastsarruse Armastek tihedus, tõmbetugevus, pikenemine ja elastsusmoodul. Võrdlemaks tootja poolt esitatud andmeid tegelikkusega on tabelis 1.5 esitatud läbiviidud katsete tulemused.

**Tabel 1.5.** Tallinna Tehnikaülikoolis katsetatud sarruste omadused (Tallinna Tehnikaülikooli Sertifitseerimisasutus 2013)

Omadus	Nominaalläbimõõt mm		
	5	6,5	14
Tihedus kg/m <sup>3</sup>	2,07	2,06	2,04
Tõmbetugevus MPa	1584	1506	1320
Pikenemine %	2,7	2,5	1,6
Elastsusmoodul MPa	$58,4 \times 10^3$	$60,5 \times 10^3$	$69,9 \times 10^3$

Võrreldes tootja esitatud andmete ja Tallinna Tehnikaülikoolis läbiviidud katsete tulemusi, siis on märgata olulisi erinevusi, väiksemate läbimõõtudega sarruste puhul tõmbetugevuse tulemustes ja suurema läbimõõduga sarruste puhul elastsusmooduli tulemustes. Näiteks on 5 mm nimiläbimõõduga klaasplastsarruse katseliselt leitud tõmbetugevus 32% ja elastsusmoodul 17% suurem kui vastavad tootja poolt esitatud minimaalsed näitajad.

Eestis on hetkel müügil Armastek klaasplastsarrused läbimõõduga 4 kuni 10 mm, mis kõik on pakendatud 50-meetristesse rullidesse (Donleon 2018). Kui materjal on rullides, siis nende läbimõõt sõltub sarruse ristlõikest ja see varieerub 85-160 sentimeetri vahel ning tänu sellele on materjali transport suhteliselt lihtne. Enamasti on klaasplastsarrus sarnase läbimõõduga terasest poolteist korda kallim. Kuid see on vaid materjali hind, lõpliku hinna kujunemiseks tuleks veel arvestada transpordikulude, varraste ülekattejätkudega, konstruktiivsete nõuete, konstruktsiooni eluea ja tuleohutusega. Joonisel 1.7 on kujutatud, et 11 000 meetri terase transpordiks on vaja pikka veoautot ja klaasplastsarruste transpordiks piisab väikesest kaubaautost.



**Joonis 1.7.** Transpordivahendi sõltuvus sarruse liigist (Armastek USA 2018).

## 1.6. Näiteid polümeerkiudsarruse kasutamisest betoonkonstruktsioonides

Esimest korda kasutati polümeerkiudsarruseid korrosiooni vältimiseks 1980ndate lõpupoole Hollandis, kus müratõkkeseinte tugipostide armeerimisel prooviti aramiidist eelpingestatud sarruseid. Armeerimiseks valiti aramiidist sarrused agressiivse keskkonna tõttu, et teada saada, kuidas need peavad vastu pikaajaliselt jääsulatussoolade ja masinate heitgaaside käes. 1996. aastal rajati Inglismaale Euroopa esimene täielikult polümeerkiudsarrusega armeeritud sild (joonis 1.8), see sai võimalikuks tänu projektile EUROCRETE. Projektile järgnes veel mitmeid näidisprojekte, nende hulgas sild Norra golfikeskuses. Tänu neile avastati, et polümeerkiudsarrusega betooni armeerides on

võimalik vähendada sarruste kaitsekihti ja seetõttu valmistada väiksemate ristlõigetega konstruktsioone. (Burgoyne jt 2007)



**Joonis 1.8.** Euroopa esimene täielikult polümeerkiudsarrusega armeeritud sild, mis rajati projekti EUROCRETE raames (Burgoyne jt 2007).

Tänapäeval vajavad paljud sillad uuendamist, sest nende ehituse ajal polnud arvestatud järjest suureneva liikluskoormusega. Selliseks näiteks sobib suurepäraselt Crowhchild'i sild Kanadas, mis on kujutatud joonisel 1.9. Antud silla pikkuseks on 90 meetrit ja laiuseks 11 meetrit, sellel asetseb kaks liiklusrada ja koosneb kolmest sildeavast. Silla plaat on iseenesest armeerimata, kuid pragunemise vältimiseks kasutati polüpropüleenkiudusid, plaadi toetuseks on armeeringu asemel kasutusel viis terastala. C-klaasist klaasplastsarruseid kasutati silla erinevate osade ühendamiseks ja jätkamiseks ning lisaks kasutati neid veel külgmiste konsoolsete osade armeerimisel. Tänu uudsemate lahenduste otsimisele saavutati antud silla puhul korrosioonikindlam, tugevam ja madalamate hoolduskuludega sild erinevalt traditsioonilistest lahendustest. Silla seisukorra jälgimiseks paigaldati sellele erinevad kaugjälgitavad andurid. (Newhook, Svecova 2007)



**Joonis 1.9.** Crowchild'i sild Kanadas (Newhook, Svecova 2007).

Sarnaselt sildadele on suur korrosioonioht erinevate sadamarajatiste puhul, sest nad puutuvad aastaringselt kokku soolase mereveega ja see loob metalli korrodeerumiseks väga head tingimused. Kanadas Nova Scotia's asuvast Halls'i sadamakaist (joonis 1.10) sai riigi esimene kai, kus armeerimiseks kasutati klaaskiudsarrust. Kai projekteerimise käigus jõuti selgusele, et tavapäraste materjalide ehk terase asendamisel klaaskiudsarrustega läheb projekti maksumus 20 000 dollarit ehk 4,5 protsenti rohkem maksma. Pikaajalises plaanis oli antud valik tasuvam, kuna selle asendusega kaasneb rajatise eluea tõus 30 aastalt 60-80 aastani koos minimaalsete hoolduskuludega. Kai seisukorra jälgimiseks paigaldati veel erinevaid andureid. Antud kai puhul toodi kasutusele uudseid konstruktiivseid lahendusi, näiteks vaiapeade puhul koosneb väline sarruste kiht klaaskiud- ja sisemine terassarrustest. Sillateki paneelide armeerimisel kasutati sünteetilisi kiude ja selleks, et need peaksid vastu tormide aegsele lainete tõstejõule, paigaldati ka klaaskiudsarrused. (Newhook, Svecova 2007)





**Joonis 1.10.** Halls'i sadamakai Kanadas Nova Scotia's (Newhook, Svecova 2007).

Kuna polümeerkiudsarrusel on mittemagneetilised omadused erinevalt terassarrustest, siis on võimalik seda kasutada ka konstruktsioonides, kus on vajalik neutraalsus. Jaapanis oli polümeerkiudsarruste uurimine esialgu ajendatud magneetilise raudteesüsteemi ehk MAGLEVi arendajate poolt (joonis 1.11). Lisaks on mittemagneetilisus oluline veel suurte mootorite vundamentides, radarijaamades ja magnetskännerseadmete konstruktsioonides. (Burgoyne jt 2007)



**Joonis 1.11.** Magnethõljukrong Jaapanis (Burgoyne jt 2007).



Võrreldes terassarrustega on polümeerkiudsarrustel väike lõiketugevus ja seega on see hea lahendus ajutiste konstruktsioonide valmistamiseks. Näiteks, kasutatakse lahendust ajutiste seinte „pehme silma“ (ingl. soft-eye) armeerimisel, millest hiljem on vaja tunneli puurmasinatega läbi minna (joonis 1.12). Kasutusel on polümeerkiudsarrused, kuna terassarrused kahjustaks masina lõikeriistasid kui ka korpust. (Burgoyne jt 2007)



**Joonis 1.12.** „Pehme silma“ armeerimine klaasplastsarrusega ja selle läbimine tunneli puurmasinaga (Burgoyne jt 2007).

## 1.7. Magistritöö eesmärgid ja ülesanded

Käesoleva magistritöö eesmärgiks on katseliselt uurida klaasplastsarrusega Armastek armeeritud talade läbipainet ning paindekandevõimet tulekahjujärgselt ning analüüsida ja võrrelda saadud tulemusi. Katsetulemusi võrreldakse Henry Maaski (2018) poolt saadud tulemustega, mis saadi identsete kuumutamata katsekehade seeriade katsetamisel paindele.

Magistritöö eesmärkide saavutamiseks on vaja välja töötada katsemetoodika talade kuumutamiseks, sest puuduvad võimalused selle sooritamiseks kehtiva standardi järgi. Kui katsemetoodika on välja töötatud, siis katsete läbiviimiseks valmistatakse vajalikud seadmed katsekehade kuumutamiseks ja paindekatseteks.

Katseteks valmistatakse seitse erinevat seeriat klaasplastsarrusega Armastek armeeritud katsekehasid, mis erinevad teineteisest betoonkaitsekihi suuruse ja armeerimisskeemi poolest.

## **2. KLAASPLASTSARRUSEGA BETOONTALADE PAINDETÕMBETUGEVUSE TULEKAHJUJÄRGNE UURIMINE**

### **2.1. Katsekehad**

Klaasplastsarrustega armeeritud katsekehade valmistamise aluseks sai võetud standard EVS-EN 12390-1:2012 Kivistunud betooni katsetamine, *Osa 1: Kuju, mõõtmed ja muud katsekehadele ja vormidele esitatavad nõuded*. Seoses sellega valiti katsekeha ristlõikeks 150×150 mm. Ettenähtud normi nõudest tuleneb, et katsekeha pikema külje minimaalseks pikkuseks on  $L \geq 3,5d$ . Standardit arvestades on antud ristlõike puhul minimaalseks pikkuseks 525 mm.

Võttes arvesse standardis ettenähtud minimaalseid nõudeid, valmistati katsekehad mõõtmetega 150×150×600 mm. Katsekehade joonised on esitatud lisa 1. Katsekehade valmistamisel kasutati OÜ TMB Element tootmishoones olevat köetavat aluslauda, kuhu asetati üksikud ja mitme katsekeha raketised (Lisa 2, joonis a). Vormide ettevalmistamisel ja betoonivalul lähtuti standardist EVS-EN 12390-2:2009 *Kivistunud betooni katsetamine. Osa 2: Tugevuskatse katsekehade valmistamine ja hoidmine*. Järgmise tegevusena õlitati vormid vormiõliga ja nendesse paigaldati ka sarrused koos tugevusega (Lisa 2, joonis a). Talade armeerimiseks kasutati Armastek klaasplastsarruseid ja nende pikkuseks valiti 599 mm. Järgmiseks täideti vormid 1/5 mahust, et fikseerida sarrused nendele ettenähtud kaitsekihtidega (Lisa 2, joonis b). Lõpuks täideti vormid täielikult betooniga ja tihendati vibronuiaga. Vormid avati peale 24 tunnist betooni kivistumisperioodi köetaval alusel. Katsekehade valmistamiseks kasutati betooni survetugevusklassiga C35/45. Korraga valati kahe seeria katsekehad ehk kümme tükki ning kokku valmistati 35 katsekeha, millest iga seeria koosnes viiest katsekehast. Seeriad erinesid sarruse läbimõõdu või kasutatud kaitsekihi paksuse poolest. Valmistatud katsekehad on näidatud lisa 2 joonisel c.

Betooni 28 päeva survetugevuse määramiseks viidi katsed läbi OÜ TMB Element laboris. Katsetatavad kuubid olid valatud betoonisegust koodiga 1454 2017. aasta lõpus, antud koodiga betoon oli kasutusel ka talade valmistamiseks. Igal päeval valatud talade betooni

kohta eraldi survetugevust ei määratud, kuna ettevõttes on pidev kvaliteedikontroll ja seetõttu püsib valmistatava segu kvaliteet ühtlane. Järgnevas tabelis on esitatud OÜ TMB Element laboris läbiviidud katsete tulemused.

**Tabel 2.1.** OÜ TMB Element laboris määratud betooni survetugevus

Valu kuupäev	Betoonisegu kood	Betooni klass	Tihedus kg/m <sup>3</sup>	Tugevus (28p) MPa
22.11.2017	1454	C35/45	2403	68,8
29.11.2017	1454	C35/45	2366	62,5
13.12.2017	1454	C35/45	2421	65,7
18.12.2017	1454	C35/45	2401	68,2

Katsekehade seeriade eristamiseks märgistati nad järgnevate lühenditega:

- 1 - 2×8 mm sarrus ja 40 mm kaitsekiht;
- 2 - 2×8 mm sarrus ja 30 mm kaitsekiht;
- 3 - 2×8 mm sarrus ja 15 mm kaitsekiht;
- 4 - 2×10 mm sarrus ja 15 mm kaitsekiht;
- 5 - 2×6 mm sarrus ja 30 mm kaitsekiht;
- 6 - 2×6 mm sarrus ja 15 mm kaitsekiht;
- 7 - 4×6 mm sarrus ja 15 mm kaitsekiht.

Kui katsekehad olid valminud ja vormist eemaldatud, transporditi need OÜ TMB Element tootmistsehhist Eesti Maaülikooli laborisse, kus neid hoiustati vees minimaalselt 28 päeva (Lisa 2, joonis d). Kuna katsekehad valmisid seeriade kaupa, siis kõige kauem olid vees esimeste seeriade katsekehad, vees hoiti neid 37 päeva, ja veidi vähem viimasena valminud, 31 päeva. Peale seda võeti katsekehad veest välja ja hoiustati siseruumides kuivades tingimustes 24 päeva, et võimaldada nende osaline konditsioneerimine kuumutamiskatsete ajaks (Lisa 2, joonis e). Kehtiva standardi (EVS-EN 1363-1:2012) järgi peaksid betoonist katsekehad konditsioneerima vähemalt kolm kuud õhutemperatuuril 23 °C ja suhtelisel niiskusel 50 %. Katsekehade hilise valmimise tõttu piirdus talade konditsioneerimisperiood kahe kuuga.

Enne katsete alustamist mõõdeti katsekehad mõõdulindi ja nihikuga ning kaaluti. Katsekehade mõõdistuste tulemused on esitatud lisa 3 katseprotokollides.

## 2.2. Kuumutamine

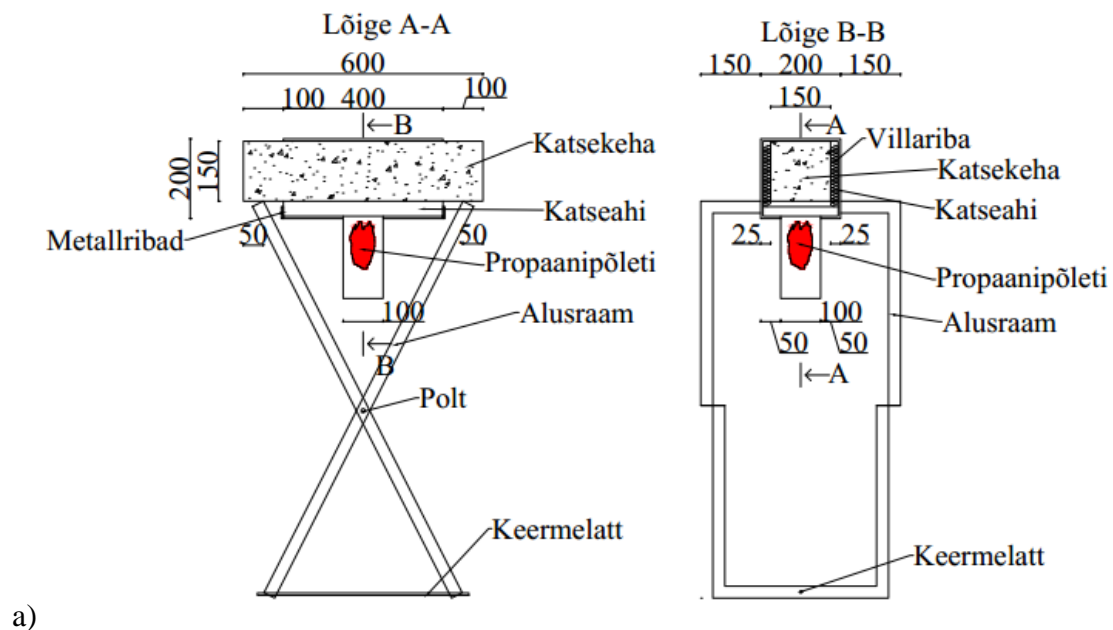
Eestis on kandvate talade tulepüsivuse katsete läbiviimiseks kehtiv standard EVS-EN 1365-3:2002 *Kandetarindite tulepüsivuse katsed. Osa 3: Talad*. Antud meetodil polnud võimalik koolis katseid läbi viia, kuna selleks puudusid vastavad seadmed ja ruumid, kus talasid kuumutada. Standardi järgi oli ettenähtud talade samaaegne kuumutamine ja nendele konstantse koormuse rakendamine. Sellel meetodil tuleks tala põletada seni kuni see koormuse ja kuumuse koosmõjul puruneb. Katseahju temperatuur teatud ajahetkedel on kehtiva standardi (EVS-EN 1363-1:2012) järgi ettenähtud kuumuskõveraga, kus keskmine temperatuur peab vastama suhtele:

$$T = 345 \log_{10}(8t + 1) + 20 \quad , \quad (2.1)$$

kus  $T$  – katseahju keskmine temperatuur °C;

$t$  – aeg täisminutites.

Kuumutamise meetoodika väljatöötamisel arvestati olemasolevaid vahendeid ja võimalusi. Seetõttu sai meetodiks valitud talade kuumutamine, jahutamine toatemperatuurini ja nende hilisem katsetamine paindele. Talade kuumutamiseks valmistati seade, mis koosnes alusest, katseahjust ja põletist. Aluse valmistamisel valiti tugevde telgede vaheliseks kauguseks (ehk tala sildeks) kuumutamise hetkel 50 sentimeetrit. Katseahi valmistati nelikanttorust profiiliga 200×200×6 mm, sarruste ankurduse kaitseks valiti selle pikkuseks 400 mm ja ahju alumisele küljele valmistati ava põletile. Tala paigaldati eelnevalt torukujulisse ahju ja seejärel tõsteti alusele, kus toimus kuumutamine; ahi omakaaluga 18,34 kilogrammi toetus kuumutamise vältel talale. Enne talade kuumutamist tihendati ahjus kuumuse säilitamiseks tala ja ahju vahelised avad otstes kivivillaga. Kuumutamise vahendiks sai valitud lamekatuste ehitusel laialt levinud propaanipõleti, põletis kasutati majapidamisgaasi, mille leek suunati ahju all olevast avast tala alumisele küljele. Katseskeemi lõiked ja foto katse käigust on esitatud joonisel 2.1. Kuumutamisega seotud toimingud viidi läbi välistes tingimustes.



a)



b)

**Joonis 2.1.** Kuumutamiskatse skeem (a) ja pilt (b).

Meetodi proovimiseks viidi esmalt läbi eelkatsete kahe proovikehaga. Kuumutamise kestvusajaks valiti kandvate tarindite puhul minimaalne tulepüsivuskestvus, milleks on 30 minutit, ja sellise tulekahju kestvuse puhul on antud ristlõikega raudbetoonialade puhul minimaalseks kaitsekihi paksuseks 15 mm (Masso jt 2014). Kuna puudusid vahendid põletist väljuva leegi kuumuse mõõtmiseks, siis temperatuuri mõõtmiseks valiti kuumutamisejärgse maksimaalse pinnatemperatuuri mõõtmine. Kuumutamise tulemusel plaaniti saavutada talade pinnatemperatuuriks 400 °C, mida mõõdeti koheselt peale katsekeha eemaldamist ahjust. Temperatuuri mõõtmiseks oli kasutusel infrapunatermomeeter KEMPTEN GM700 (joonis 2.2). Antud termomeetriga on võimalik

mõõta temperatuuri kuni 700 °C. Enne talade katsetamist paindele hoiustati neid toatemperatuuril täieliku jahtumiseni.



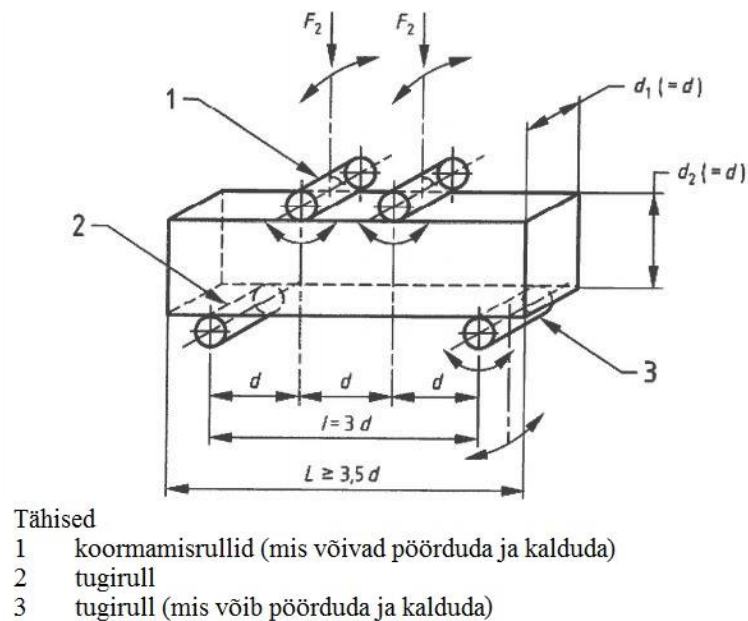
**Joonis 2.2.** Infrapunatermomeeter KEMPTEN GM700 (Infrapuna termomeeter... 2018).

### 2.3. Paindekatse

Talade katsetamine paindele toimus vastavalt standardile EVS-EN 12390-5:2009 *Kivistunud betooni katsetamine. Osa 5: Katsekehade paindetõmbetugevus*. Antud meetodi puhul rakendatakse prismakujulisele katsekehale koormust kasutades nelja punkti paindeskeemi. Suurim koormus fikseeritakse ja arvutatakse paindetõmbetugevus.

Katse teostamiseks vastavalt standardis sätestatud nõuetele peab koormamisseade (joonis 2.3) koosnema kahest tugirullist ning kahest ülemisest rullist ja neid ühendavast vahelülist, mis jaotab rakendatud jõu ühtlaselt mõlema rulli vahel. Kõik rullid peavad olema terasest ringikujulise ristlõikega, mille läbimõõt on 20 kuni 40 mm. Rullide pikkus peab ületama katsekeha laiust vähemalt 10 mm võrra. Kolmel rullil, sealhulgas kahel ülemisel, peab olema võimalik pöörduda nii ümber oma telje kui ka katsekeha pikitelje risttasapinnas.

Tala otsa pool asuvate rullide telgede vaheline kaugus (st sille) peab võrduma  $3d$ -ga ja sisemiste rullide vahekaugus peab võrduma  $d$ -ga, kus  $d$  on katsekeha laius. Sisemised rullid peavad olema paigutatud välimiste vahele võrdsete kaugustega, nagu näidatud joonisel 2.3. Kõik rullid tuleb seada joonisel 2.3 näidatud kohtadele täpsusega  $\pm 2,0$  mm. (EVS-EN 12390-5:2009)



**Joonis 2.3.** Paindekatse skeem (EVS-EN 12390-5:2009).

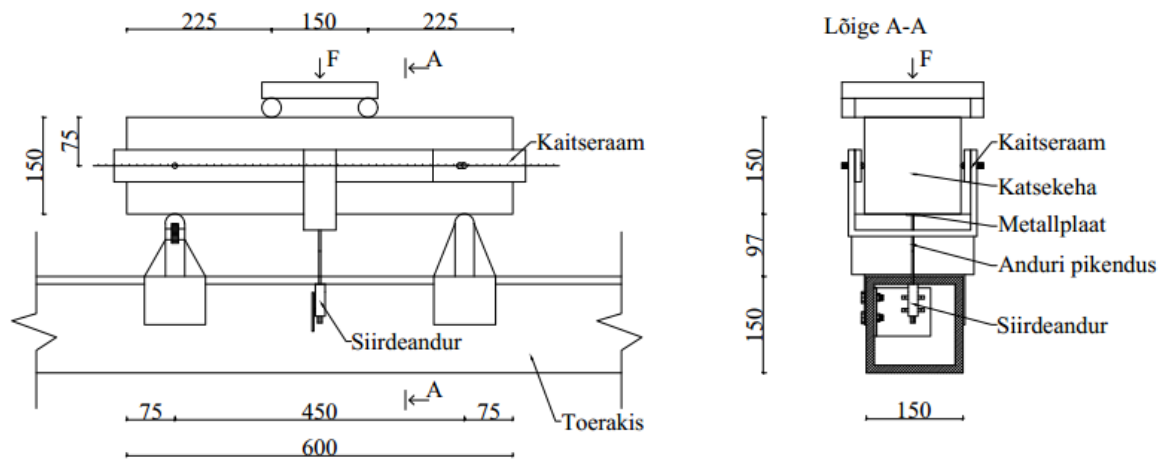
Paindetõmbetugevuse katsemasina valiku aluseks võeti standard EVS-EN 12390-4:2002 *Kivistunud betooni katsetamine. Osa 4: Survetugevus. Katsemasinatele esitatavad nõuded*, selle alusel sobis Eesti Maaülikooli katselabori masinatest talade katsetuseks katsemasin „ЗИМ П-125“ (joonis 2.4). Katsekehadele rakendati koormust kiirusega  $0,04-0,06$  N/mm<sup>2</sup>.





**Joonis 2.4.** Katsemasin „3ИМ II-125“.

Katsekehade läbipainde mõõtmiseks kasutati siirdeandurit täpsusega 0,01 mm ja saadud andmete salvestamiseks katsemasina tarkvara MTS. Läbipainde mõõtmiseks paigaldati siirdeandur rakise sisse, tugele vahele, ja selle kolvile keerati otsa pikendus (joonis 2.5). Tala ümber paigaldati siirdeanduri kaitseks ja ohutuse tagamiseks terasest kaitseraam. Esimese seeria katsekehade läbipainet mõõdeti kuni nelja millimeetrini ja järgmiseid kuni kolme millimeetrini, sest talade purunemine toimus üsna lähedal neljale millimeetrile, mis võis rikkuda siirdeandurit. Anduri kaitsmiseks eemaldati kolvi pikendus ning andur peideti rakisesse. Seetõttu on lisas 8 näidatud katseseeriade paindediagrammid esitatud läbipaindeni kolm millimeetrit ja esimese seeria puhul kuni neli millimeetrit.



**Joonis 2.5.** Katsekeha koos raamiga läbipainde mõõtmiseks.

Katsete korralikuks sooritamiseks puhastati rakis peale igat purustamist, et uue katsekeha paigutamisel rakisele ei jääks tuge ja tala vahele mingit sodi. Katsekeha paigaldati rakisele alati tsentreeritult, selle pikitelg oli tuge suhtes alati täisnurga all. Standardist EVS-EN 12390-5:2009 tulenes alumiste tuge omavaheliseks kauguseks 450 mm ja ülemiste rullide omavaheliseks kauguseks katsekeha tsentrist 150 mm.

Konstruksioonide lubatud läbipaine on avaldatav järgmise valemiga tingimusel, et see ei kahjusta teisi konstruktsioone (Masso jt 2014):

$$F_{k,adm} = l_{eff}/500, \quad (2.2)$$

kus  $F_{k,adm}$  – tala lubatud läbipaine mm;

$l_{eff}$  – elemendi arvutussille mm.

Antud valemi järgi tuleb katsekehade lubatud läbipaindeks kasutuspiiriseisundis 0,9 mm. Paindekatse käigus koormati talasid kuni läbipaindeni kolm millimeetrit, et teada saada, kui palju mõjutab tulekahju selle kulgemist. Katsekehade kolme millimeetri läbipainde saavutamisel peatati koormamine ning siirdeandur eemaldati. Peale seda jätkus tala koormamine kuni selle lõpliku purunemiseni ja purunemisviisi pildistati. Pildid on esitatud lisa 5. Lähtudes standardist EVS-EN 12390-5:2009, arvutatakse lõplik paindetõmbetugevus valemiga:

$$f_{cf} = \frac{Fl}{d_1 d_2^2} \quad , \quad (2.3)$$

kus  $f_{cf}$  – paindetõmbetugevus MPa;

$F$  – maksimaalne koormus N;

$l$  – tugirullide telgede vahe mm (käesolevas uurimustöös 450 mm);

$d_1, d_2$  – katsekeha ristlõike mõõtmed mm.

Paindetõmbetugevus esitati täpsusega 0,1 MPa. Koostatud katseprotokollid on esitatud koos paindetõmbetugevuse arvutustulemustega lisades 6 ja 7.

### 3. KATSETULEMUSED JA ANALÜÜS

Katsekehade purunemine sai alguse kuumutamise ajal, kui selle tulemusel eraldus üheksal talal juba kuumutamise algusminutitel väikeste plahvatustega betoonitükke. Üheks arvatavaks põhjuseks on katsekehade liiga kõrge niiskustase kuumutamise hetkel. Enamasti jäi tekkinud kraatri diameeter alla 10 cm ja sügavus alla ühe sentimeetri. Ühe viienda seeria tala puhul eraldus alumisest küljest ligi 15×15 cm suurune tükk (joonis 3.1). Kuumutatud katsekehade maksimaalsed pinnatemperatuurid jäid vahemikku 353-466 °C (Lisa 4) – ebaühtlase temperatuuri kõige suuremateks mõjutajateks olid vahelduvad ilmastikutingimused. Kõigil taladel esinesid peale kuumutamist praod. Ühel seerial oli silmaga märgatav pragu, mis jooksis kogu kõrguse ja laiuse ulatuses tala keskelt. Seeria, kus see juhtus, oli viimane ehk seitsmes, milles oli armeeringuna kasutusel 4×6 mm sarrust kaitsekihiga 15 mm.



**Joonis 3.1.** Kuumutamise tulemusel talast eraldunud tükk.

Katsekehade purunemine paindekatsel toimus põhiliselt kahel erineval viisil – painde mõjul keskelt või põikjõu tõttu toe kohalt. Enamasti hakkasid kuumutamise käigus taladesse tekkinud praod edasi arenema ja sellele järgnes purunemine. Peamised esinenud purunemispildid on esitatud lisas 5. Purunemisel oli märgata sarrusele nakke tugevdamiseks spiraalselt vaiguga liimitud klaaskiu eraldumist, betooni purunemist sarruste ümbert, klaaskiude ühendava vaigu sulamist ja ka sarruste purunemist (joonis 3.2).



**Joonis 3.2.** Klaasplastsarruse Armastek purunemine.

Katsekehade purunemisjärgsel vaatlusel selgus, et 40 mm kaitsekihiga katsekehade sarruste välimuses ei esinenud silmnähtavaid muudatusi, 30 mm kaitsekihi puhul esines sarruste värvuses juba väikseid muudatusi ehk kuumus jõudis sarrusteni. Selle tulemusel oli sarruse värv muutunud õrnalt pruunikaks. 15 mm kaitsekihi puhul oli juba osaliselt või täielikult sulanud põleti kohal paiknevate sarruste vaigukiht ning alles olid vaid kiud (joonis 3.3). Sarruse kiud püsisid omavahel koos, sest tala otsad olid kaitstud tule eest ja seal säilis sarruste sidusaine. Kuigi vaik oli sarruse koostisest sulanud, võtsid talad ikkagi suhteliselt hästi koormust vastu.



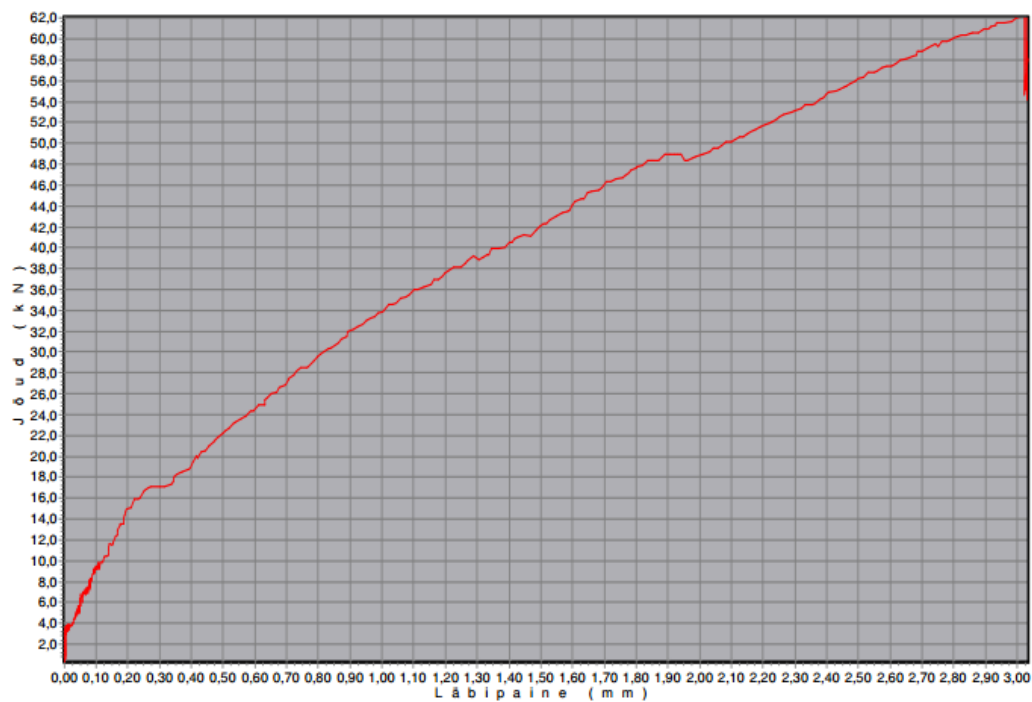
**Joonis 3.3.** Sulanud vaiguga sarrus.

Tulemuste analüüsis keskendutakse peamiselt talade lubatud läbipainde ning paindetõmbetugevuse uurimisele ning tehtud katsete tulemusi võrreldakse Henry Maaski (2018) poolt läbiviidud kuumutamata talade paindekatse tulemustega. Järgnevas tabelis on välja toodud katseseeriade andmed.

**Tabel 3.1.** Seeriade katsekehade andmed

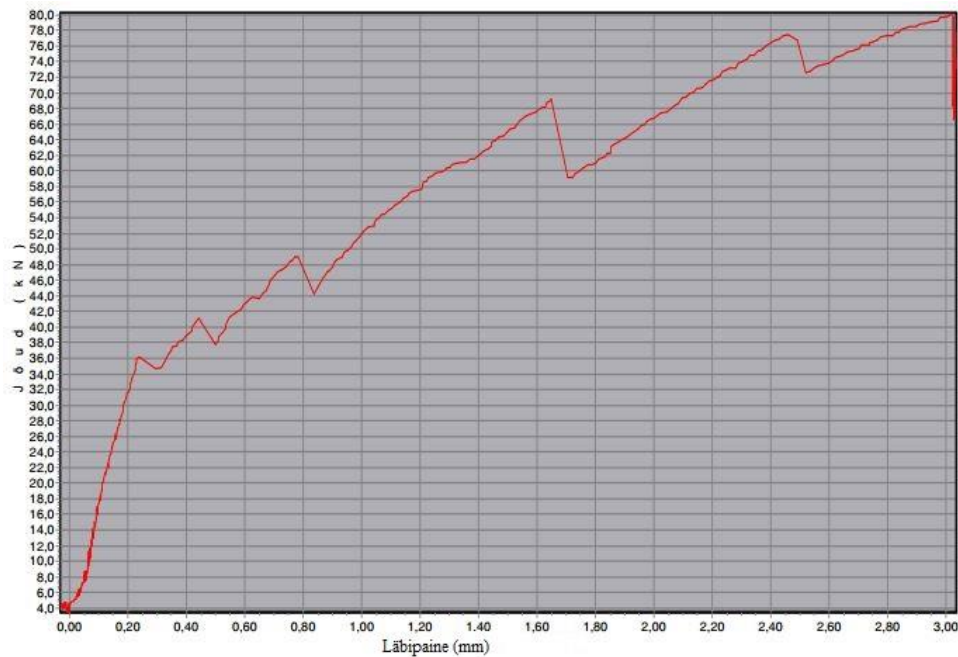
Katseseeria tähis	Sarruse liik	Sarruse läbimõõt mm	Kaitsekihi paksus mm	Sarruste arv	Katsekehade kogus
1	Armastek AKC 8	8	40	2	5
2	Armastek AKC 8	8	30	2	5
3	Armastek AKC 8	8	15	2	5
4	Armastek AKC 10	10	15	2	5
5	Armastek AKC 6	6	30	2	5
6	Armastek AKC 6	6	15	2	5
7	Armastek AKC 6	6	15	4	5

Katsete käigus purunes ootamatult üks katsekeha enne soovitud kolme millimeetrise läbipainde saavutamist, purunemise hetkel oli läbipaine 2,54 mm. Kõige tugevam tala purunes 130 kN ja nõrgim 52,5 kN juures. Lubatud läbipainde saavutasid katsekehad vahemikus 15,0 kuni 36,3 kN. Katsekehade ja seeriade paindediagrammid olid kõik sarnased. Omavahel erinesid märgatavalt kuumutatud ja kuumutamata katsekehade paindediagrammid ning need on kujutatud joonisel 3.4 ja 3.5.



**Joonis 3.4.** Kuumutatud (TKP) katsekehade tüüpiline paindediagramm (väljavõte tarkvarast).





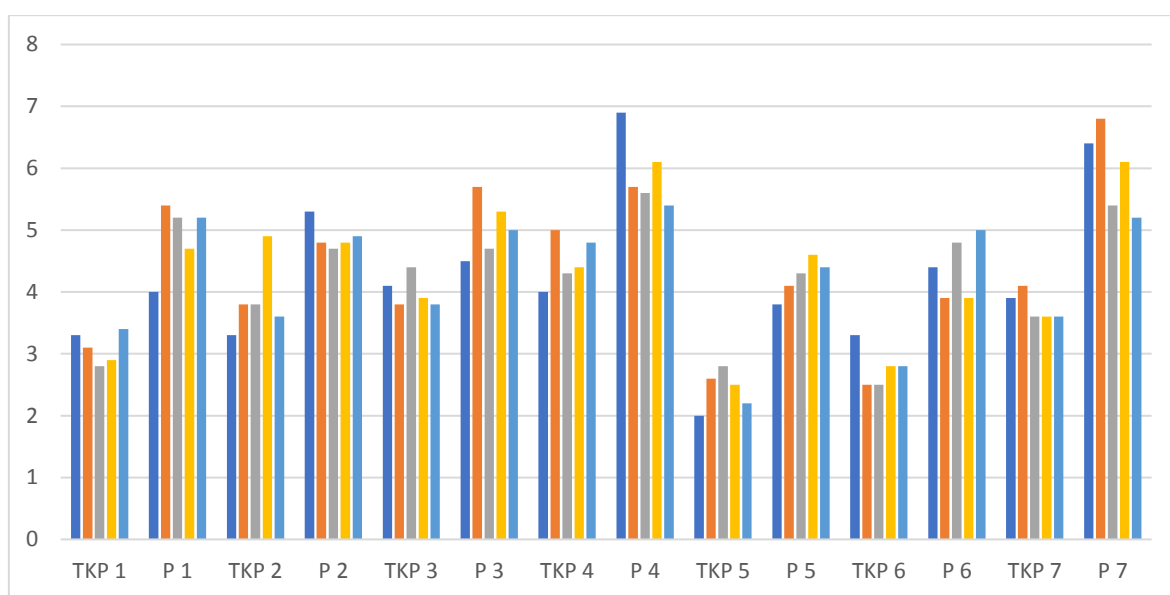
**Joonis 3.5.** Kuumutamata (P) katsekehade tüüpiline paindediagramm (väljavõte tarkvarast).

Paindediagramme ja katsete käiku vaadeldes saab järeldada, et kuumutatud katsekehade paindediagrammid on ühtlasem muutumisega ehk ilma astmeteta. Selle eeldatavaks põhjuseks on, et kuumutamisel tekkinud praod arenesid lihtsalt edasi ja uusi pragusid praktiliselt ei tekkinud. Kuna kuumutamata katsekehad olid algul praovabad, siis iga järsk muutus diagrammil tähendab uue prao tekkimist betooni tõmbetugevuse ületamisel. Kuumutamata ja kuumutatud katsekehade paindetõmbetugevused purunemisel ja lubatud läbipainde (0,9 mm) korral on esitatud lisades 6 ja 7. Esialgselt püstitatud hüpoteeside tõestamiseks teostati MS Excelis T-Test, mis toob välja katsete tulemustes statistiliselt keskmiselt olulised erinevused. Järeldused T-Testi tulemustest on välja toodud peatükkides 3.1 ja 3.2. T-Testi liik valiti vastavalt F-Testi tulemustele: kui  $p < 0,05$ , siis toimus kahe üldkogumi keskväärtuste võrdlemine erinevate dispersioonide korral, ja kui  $p > 0,05$ , siis toimus kahe üldkogumi keskväärtuste võrdlemine võrdsete dispersioonide korral. Kõikide seeriade omavahelised T-Testid on esitatud lisades 9-15.



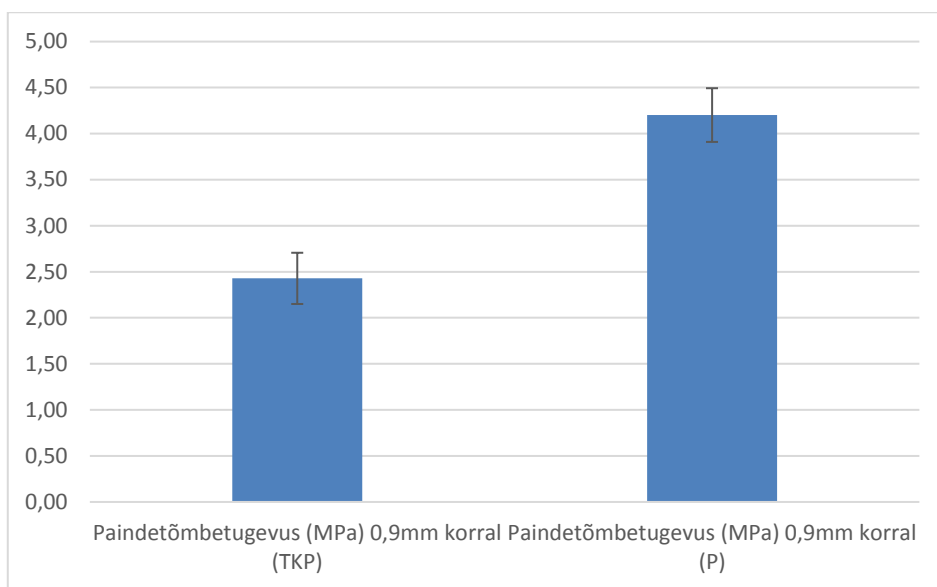
### 3.1. Paindetõmbetugevus lubatud läbipainde puhul

Vastavalt püstitatud hüpoteesidele saavutab tala tulekahjujärgselt lubatud läbipainde väiksema paindekandevõimega kui kuumutamata talade puhul. Kuna kõik kuumutatud katsekehad saavutasid lubatud läbipainde väiksema paindekandevõime puhul kui kuumutamata talad, siis sai seatud hüpotees tõestatud. Kuumutamata ja kuumutatud katsekehade paindetõmbetugevused 0,9 mm läbipainde korral on kujutatud seeriade kaupa joonisel 3.6.

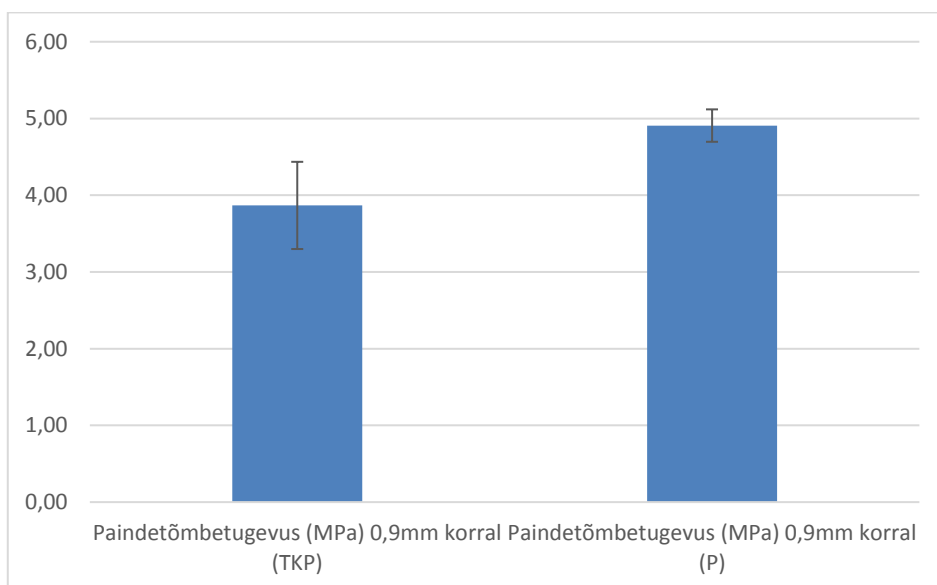


**Joonis 3.6.** Kuumutamata (P) ja kuumutatud (TKP) katsekehade paindetõmbetugevused lubatud läbipainde (0,9 mm) korral.

Hüpoteesi kinnitati nii mõõdetud tulemuste vaatlusel kui ka T-Testi sooritamisega, mis näitas, et kõikide seeriade keskmised olid omavahel oluliselt erinevad ( $p < 0,05$ ). Katseseeriade keskmiste tulemuste võrdlusel selgus, et lubatud läbipainde puhul jäid kuumutatud ja kuumutamata talade paindekandevõime erinevused 1,02 kuni 2,22 MPa. Kõige suurem keskmiste erinevus esines seitsmendas ja väikseim kolmandas seerias. Statistiliselt oli kõige suurem viienda ja väikseim erinevus teise seeria vahel. Järgnevatel joonistel 3.7 ja 3.8 on esitatud suurima ja väikseima statistilise erinevusega seeriade graafikud koos usalduspiiridega.



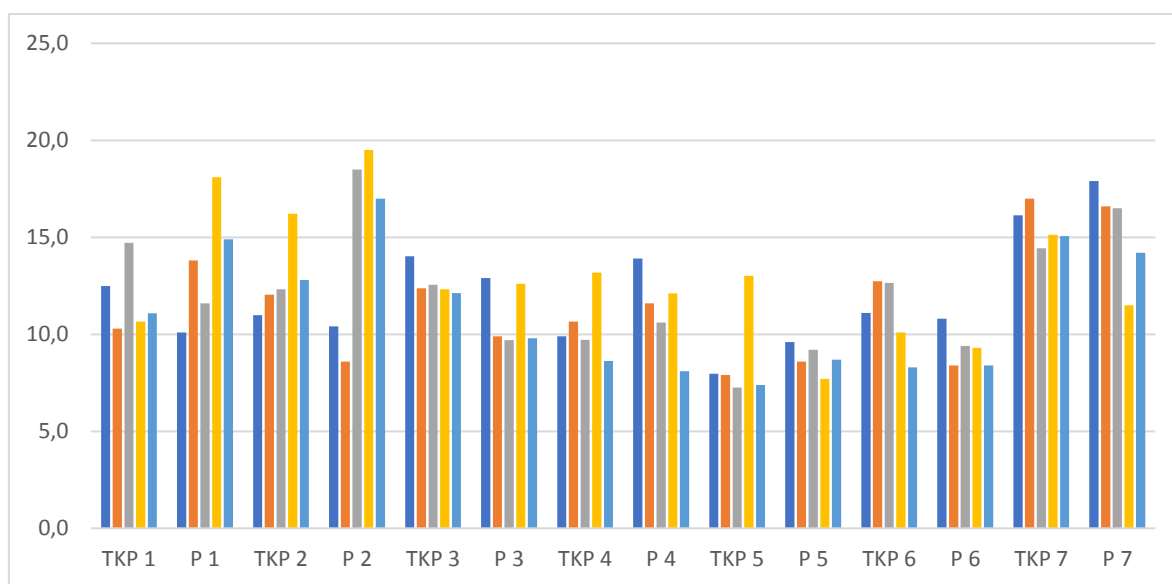
**Joonis 3.7.** Viienda katseseeria keskmiste paindetõmbetugevuste graafik lubatud läbipainde (0,9 mm) korral koos usalduspiiridega.



**Joonis 3.8.** Teise katseseeria keskmiste paindetõmbetugevuste graafik lubatud läbipainde (0,9 mm) korral koos usalduspiiridega.

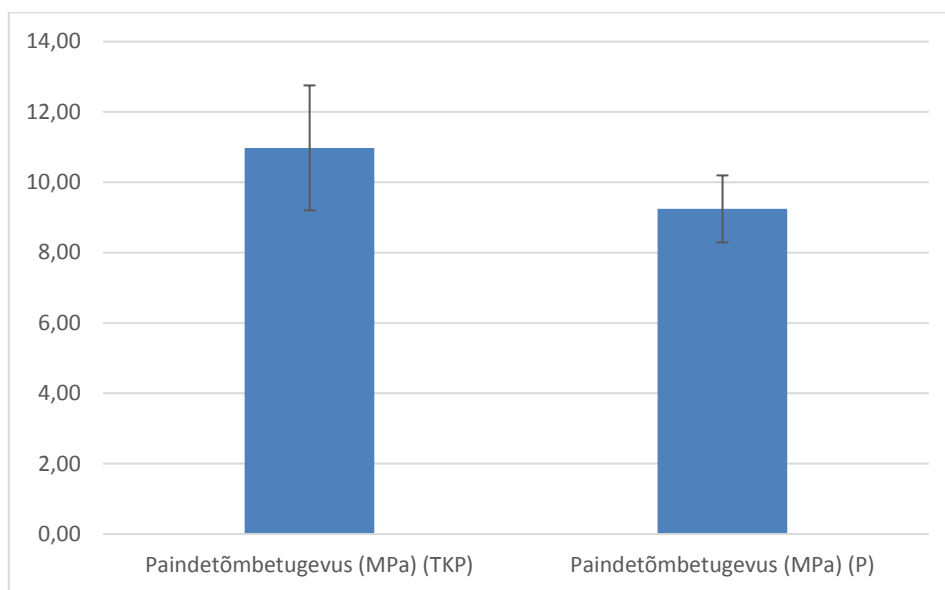
### 3.2. Paindetõmbetugevus purunemisel

Teine esialgselt seatud hüpotees eeldas, et tulekahjujärgselt on tala paindekandevõime madalam, kui kuumutamata talade puhul. Kolme seeria kuumutatud katsekehad olid keskmiselt suurema paindekandevõimega, kui kuumutamata talad ja nendeks olid kolmas, kuues ja seitsmes. Kuumutamata ja kuumutatud katsekehade paindetõmbetugevused purunemisel on kujutatud seeriade kaupa joonisel 3.9.



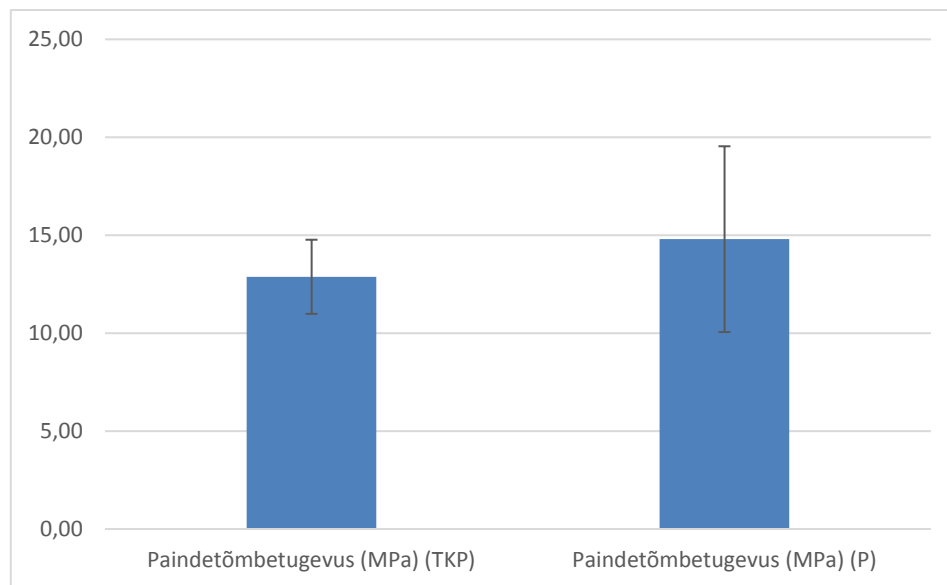
**Joonis 3.9.** Kuumutamata (P) ja kuumutatud (TKP) katsekehade paindetõmbetugevused purunemisel.

Kuna kõikide kuumutatud ja kuumutamata katseseeriade keskmised paindetõmbetugevused polnud omavahel statistiliselt olulised, siis seetõttu ei saanud esitatud hüpotees kinnitust. Kõige suurem erinevus kuumutamata katsekehade kasuks oli kuuendas seerias, mis oli armeeritud 6 mm läbimõõduga sarrustega 15 mm kaitsekihi juures. Antud seeria oli 1,73 MPa tugevam kui kuumutamata saavutades keskmiseks paindetõmbetugevuseks 10,98 MPa. See erinevus on kujutatud joonisel 3.10. Lisaks oli antud seeria ka üks kahest, mis statistiliselt oluliselt erines ( $p=0,05$ ) kuumutamata katsekehadest. Erines ka kolmas seeria, mille puhul olid kuumutatud katsekehad tugevamad. Mõlemal juhul kannatasid enamus katsekehad ühtlaselt tugevamaid koormusi võrreldes kuumutamata taladega.



**Joonis 3.10.** Kuuenda katseseeria keskmiste paindetõmbetugevuste graafik koos usalduspiiridega.

Enamus kuumutatud seeriade puhul, mis olid statistiliselt kuumutamata seeriatega sarnased, nende puhul olid keskmiselt tugevamad jällegi kuumutamata katsekehad. Nendegi sekka sattus üks seeria, kus kuumutatud oli mingil määral tugevamad ja seda vaid 0,21 MPa võrra, mis jääb aga mõõtemääramatuse piiridesse. Viienda seeria talade puhul polnud tulemus statistiliselt oluline ( $p=0,48$ ), kuna ühe kuumutatud katsekeha paindetõmbetugevus oli sama seeria tugevaimast kuumutamata talast 3,4 MPa võrra suurem, antud erinevus on näha ka joonisel 3.9. Keskmiseid tulemusi analüüsides selgus, et teise seeria puhul võrreldes ülejäänutega oli kuumutamata katsekehade paindetõmbetugevus suurem kui kuumutatutel. Esinenud erinevuseks oli 1,92 MPa ja see on kujutatud joonisel 3.11.



**Joonis 3.11.** Teise katseseeria keskmiste paindetõmbetugevuste graafik koos usalduspiiridega.

## KOKKUVÕTE

Polümeerkiudsarrus on kiudmaterjali ja sidusaine komposiit, mis töötati välja siis kui raudbetoonis hakkasid ilmnenud korrosiooniprobleemid. Eriti kriitiline oli olukord kohtades, kus betoon puutus kokku agressiivse keskkonnaga nagu merevesi ja jäätõrje soolad. Kuigi materjalil on palju häid omadusi, siis käesolevas töös keskenduti just tema negatiivse omaduse uurimisele, milleks on antud materjali madal temperatuuritaluvus. Kuna polümeerkiudsarruse kasutamiseks puuduvad projekteerimisjuhised, siis on materjal veel suhteliselt vähelevinud ja ei kasutata kohtades, kus tulepüsivusklass on tähtis projekteerimise nõue.

Käesolevas uurimustöös esitati kirjanduse ülevaade polümeerkiudsarruse ajaloost, koostisest, valmistamise tehnoloogiast, omadustest, betoonist katsekehade kuumutamisest ning toodi näiteid ka objektidest, kus seda on kasutatud. Magistritöö eesmärgiks oli uurida talade läbipainet ning paindekandevõimet tulekahjujärgselt erinevate betoonkaitsekihtide (15-, 30- ja 40 mm), sarruste läbimõõtude (6-, 8- ja 10 mm) ja arvu (2 ja 4 tükki) korral. Kokku valmistati ja katsetati seitset seeriat katsekehi. Uuringu tulemusi võrreldi samal aastal Henry Maaski poolt läbiviidud magistritöö katsetulemustega.

Katsekehade valmistamiseks kasutati Armastek klaasplastsarruseid, mille maaletoojaks on OÜ Donleon. Tootja esitatud andmete ja Tallinna Tehnikaülikoolis läbiviidud katsete tulemuste võrdluses on märgata olulisi erinevusi. Näiteks on 5 mm nimiläbimõõduga klaasplastsarruse katseliselt leitud tõmbetugevus 32% ja elastsusmoodul 17% suurem kui vastavad tootja poolt esitatud minimaalsed näitajad.

Katsekehadele valmistati eelnevalt vormid ja need seati valmis betoonivaluks OÜs TMB Element, valamiseks kasutati betoonsegu koodiga 1454 survetugevusklassiga C35/45. Betooni survetugevuse määramise katsed viidi läbi OÜ TMB Element laboris ja talade katsetamine toimus Eesti Maaülikooli maachituse ja veemajanduse õppetooli laboris katseseadmega „ЗМ П-125“. Enne talade paindekatseid mõeldi välja talade kuumutamise meetoodika. Vastavalt standardile on talade tulepüsivusaja määramiseks ettenähtud katsekehade samaaegne koormamine ja kuumutamine. Seoses vajalike seadmete ja

ruumide puudumisega loodi metoodika, mille kohaselt talade paindekatsed sooritati peale kuumutamist, kui need olid jahtunud toatemperatuurini. Kuumutamiseks valiti ehitusel laialt kasutatavat propaanipõletit ja kuumutamise ajal talale oli vähesel määral rakendatud koormust katseahju näol, mis kaalus 18,34 kg.

Talade paindekatsed viidi läbi vastavalt kehtivale standardile EVS-EN 12390-5:2009, milles on kirjeldatud paindetõmbetugevuse määramise metoodika. Standardist lähtuvalt viidi läbi neljapunkti paindekatse ja fikseeriti paindediagramm kuni läbipaindeni kolm millimeetrit ning koormus tala purunemisel. Lisaks vaadeldi ja märgiti üles valmistatud talade koormus lubatud läbipaindel (0,9 mm).

Kõikide katsekehade purunemine sai alguse kuumutamisest, kui taladele tekkisid esialgsed praod, ja lisaks osadel katsekehadel eraldus alumisest küljest väikese plahvatuslega betoonitükke. Ühe katseseeria puhul ilmnes peale kuumutamist keskel pragu terve tala ulatuses. Kuna katsekehade kuumutamine toimus välitingimustes, siis polnud võimalik tagada pidevalt ühtlast temperatuuri tuule tõttu. Paindekatsel purunesid katsekehad peamiselt kahel viisil – painde mõjul keskelt või põikjõu tõttu toe kohalt. Kuna kuumutamisejärgselt olid betooni esialgsed praod juba tekkinud, siis paindekatsel arenesid need edasi kuni tala purunemiseni. Katsekehade purunemisejärgsel vaatlusel selgus, et sarruse vaigukiht oli 15 mm suuruse kaitsekihiga katsekehades suures osas sulanud ja alles jäid vaid klaaskiud.

Läbiviidud katsed näitasid, et valmistatud talade lubatud läbipainde (0,9 mm) paindetõmbetugevusel mängib suurt rolli talade kuumutamine, sest kuumutatud talad saavutasid lubatud läbipainde väiksema koormuse juures kui kuumutamata katsekehad. Oluliselt mõjutas tulemusi ka valitud armatuuri läbimõõt ja betoonkaitsekihi paksus. Kuumutatud talade lubatud läbipainde korral oli suurim seeria keskmine paindetõmbetugevus  $4,53 \pm 0,37$  MPa ja väikseim  $2,43 \pm 0,28$  MPa ning armeeringuna oli kasutusel Armastek AKC 10×2 15 mm kaitsekihiga ja Armastek AKC 6×2 30 mm kaitsekihiga. Kuumutamata talade puhul olid vastavad tulemused suurim  $5,99 \pm 0,66$  MPa ja väikseim  $4,20 \pm 0,29$  MPa ning armeeringuna oli mõlemal juhul kasutusel Armastek AKC 6×4 15 mm kaitsekihiga ja Armastek AKC 6×2 30 mm kaitsekihiga. Kuumutatud ja kuumutamata seeriate keskmised erinesid  $1,62 \pm 0,6$  MPa. Antud tulemused ja tekkinud paindediagrammid näitasid selgelt, et tulekahju mõjutas katsekehade läbipainet

märkimisväärselt, sest betooni olid juba tekkinud esialgsed praod ja see ei võtnud enam vastu tõmbepingeid nagu kuumutamata katsekehade puhul.

Katsetulemused näitavad, et kuumutatud ja kuumutamata talade paindetõmbetugevused purunemisel ei erine teineteisest väga olulisel määral. Osade seeriade keskmiste puhul tuli välja, et kuumutatud katsekehad olid suurema paindetõmbetugevusega kui kuumutamata kehadel. Kuumutatud talade lubatud läbipainde korral oli suurim seeria keskmine paindetõmbetugevus  $15,55 \pm 0,96$  MPa ja väikseim  $8,7 \pm 2,31$  MPa, ning armeeringuna oli kasutusel Armastek AKC 6×4 15 mm kaitsekihiga ja Armastek AKC 6×2 30 mm kaitsekihiga. Kuumutamata talade puhul olid vastavad tulemused suurim  $15,33 \pm 2,43$  MPa ja väikseim  $8,76 \pm 0,70$  MPa, ning need on täpselt samad seeriad nagu kuumutatud talade puhul. Kuumutatud ja kuumutamata seeriade keskmised erinesid  $1,83 \pm 0,1$  MPa. Antud tulemused näitasid, et tulekahju ei mõjutanud suurel määral talade paindetõmbetugevust purunemisel.

Võttes arvesse katsete tulemusi, siis ei tohiks kasutada tulekahju üle elanud klaasplastarmeeringuga talasid kohtades, kus on ettenähtud lubatud piir läbipaindele, selleks et ei kahjustataks teisi konstruktsioone. Sel juhul tuleks kahjustada saanud talad välja vahetada või neid tugevdada.

Uurimustöös seati kaks hüpoteesi, millest üks sai kinnitust ja teine mitte. Kinnitatud sai, et tulekahjujärgselt saavutab katsekeha lubatud läbipainde väiksema paindekandevõimega kui kuumutamata talade puhul. Kinnitust ei leidnud hüpotees, et tulekahjujärgselt on talade paindekandevõime madalam kui kuumutamata talade puhul. Tehtud katsetulemustest saab järeldada, et kohtades, kus jäikustingimus konstruktsioonides pole range, on võimalik kasutada temperatuurikoormust saanud talasid, kuna need kannavad samaväärset koormust kuumutamata taladega.

Antud teema edasistes uuringutes võib:

- teostada tulepüsivuskatsed vastavalt kehtivate standarditega;
- teostada sarnased katsed, kuid tagada kogu kuumutamise vältel konstante temperatuur ja seda ka pidevalt mõõta;
- viia läbi tulepüsivuskatsed täismõõtmeliste taladega;
- teostada sarnased katsed kasutades analoogseid nt. teise tootja polümeerkiudsarruseid ja võrrelda käesolevas magistritöös saadud tulemustega.



Kirjanduse analüüsi põhjal tuuakse polümeerkiudsarruste üheks suurimaks ohuks selle madalat vastupanu kõrgetele temperatuuridele. Antud uurimustöö tulemustest lähtuvalt selgub, et enim mõjutavad kõrged temperatuurid konstruktsioonide läbipainet.

## KASUTATUD KIRJANDUS

**\*ACI Committee 440.1R-06.** (2006). Guide for the Design and construction of Structural Concrete Reinforced with FRP Bars. United States: ACI Committee 440. 44 lk, viidatud: Timma, Tõnu. 2016. Klaaskiudsarruse nakketugevuse määramine väljatõmbekatsuga: Magistritöö. Eesti Maaülikooli metsandus- ja maaehitusinstituut. Tartu. 55 lk, lk 9 vahendusel.

**ACI 440.1R-15.** (2015). Guide for the Design and construction of Structural Concrete Reinforced with Fiber-Reinforced Polymer (FRP) Bars. United States: ACI Committee 440. 88 lk.

**ACI 440R-96.** (2002). State of the art report of fiber reinforced plastic (FRP) reinforcement for concrete structures. United States: ACI Committee 440. 68 lk.

Armastek. [veebileht] <https://armastek.ru/en/our-history/> (15.02.2018)

**\*Armastek Iran.** Non-metal composite reinforcement „Armastek“ product profile. Teheran, Iran, viidatud: Timma, Tõnu. 2016. Klaaskiudsarruse nakketugevuse määramine väljatõmbekatsuga: Magistritöö. Eesti Maaülikooli metsandus- ja maaehitusinstituut. Tartu. 55 lk, lk 15 vahendusel.

Armastek USA. [veebileht] <https://armastekusa.com/> (15.02.2018)

**Balaguru, P., Nanni, A., Giancaspro, J.** (2009). FRP composites for reinforced and prestressed concrete structures. New York: Taylor & Francis. 348 lk.

**Barros, J.A.O., Taheri, M., Salehian, H., Mendes, P.J.D.** (2012). A design model for fibre reinforced concrete beams pre-stressed with steel and FRP bars. - *Composite Structures*. Vol. 94, Issue 8, pp 2494-2512.

**Burgoyne C.J., jt.** (2007). „FRP reinforcement in RC structures“. Federal Institute of Technology Lausanne, Switzerland. 151 lk.

Donleon. Klaasplastarmatuur. [veebileht] <http://donleon.ee/klaasplastarmatuur/> (15.02.2018)

EVS-EN 1363-1:2012. (2012). Tulepüsivuse katsed. Osa 1: Üldnõuded.

EVS-EN 1365-3:2002. (2002). Kandetarindite tulepüsivuse katsed. Osa 3: Talad.

EVS-EN 12390-1:2012. (2012). Kivistunud betooni katsetamine. Osa 1: Kuju, mõõtmed ja muud katsekehadele ja vormidele esitatavad nõuded.

EVS-EN 12390-2:2009. (2009). Kivistunud betooni katsetamine. Osa 2: Tugevuskatse katsekehade valmistamine ja hoidmine.

EVS-EN 12390-4:2002. (2002). Kivistunud betooni katsetamine. Osa 4: Survetugevus. Katsemasinadele esitatavad nõuded.

EVS-EN 12390-5:2009. (2009). Kivistunud betooni katsetamine. Osa 5: Katsekehade paindetõmbetugevus.

FRP / GRP pultruded profiles. [on-line] <http://www.ferrograte.com/frp-pultruded-profiles.php> (17.04.2018).

**Hajiloo, H., Green, M.F., Noël, M., Bénichou, N., Sultan, M.** (2017). Fire tests on full-scale FRP reinforced concrete slabs. - *Composite Structures*. Vol. 179, pp 705 719.

History of Reinforced Concrete and Structural Design. (2011). [on-line] <https://engineersoutlook.wordpress.com/2011/10/11/structural-concrete-design/> (24.03.2018).

**Howard, B. C.** (2014). The Surprising History of Road Salt. - *National Geographic*. [e-ajakiri] <https://news.nationalgeographic.com/news/2014/02/140212-road-salt-shortages-melting-ice-snow-science/> (24.03.2018).

Infrapuna termomeeter GM700 LASER, -50–700 °C [on-line] [http://tellimiskeskus.pureva.ee/Details/TN\\_8639?lang=et](http://tellimiskeskus.pureva.ee/Details/TN_8639?lang=et) (10.05.2018).

**Jõgi, Martin.** 2014. Klaaskiudsarrusega armeeritud silluste mehaaniliste omaduste uurimine. Magistritöö. Eesti Maaülikooli metsandus- ja maaehitusinstituut. Tartu. 64 lk.

**Maask, Henry.** 2018. Klaasplastsarrusega betoontalade läbipainde uurimine. Magistritöö. Eesti Maaülikooli metsandus- ja maaehitusinstituut. Tartu. 61 lk.

**Masso, T. jt.** (2014). Ehituskonstruktori käsiraamat. (4. tr). Tallinn: Ehitame kirjastus. 577 lk.

**Newhook, J., Svecova, D.** (2007). Reinforcing Concrete Structures with Fibre Reinforced Polymers: design manual no. 3. 2nd ed. Canada: ISIS Canada Corporation, 151 lk.

**\*Newhook, J., Svecova, D.** (2007). Reinforcing Concrete Structures with Fibre Reinforced Polymers: design manual no. 3. 2nd ed. Canada: ISIS Canada Corporation, 151 lk, viidatud: Jõgi, Martin. 2014. Klaaskiudsarrusega armeeritud silluste mehaaniliste omaduste uurimine.

Magistritöö. Eesti Maaülikooli metsandus- ja maaehitusinstituut. Tartu. 64 lk, lk 9 vahendusel.

Pultrusion. [on-line] <https://en.wikipedia.org/wiki/Pultrusion> (10.05.2018).

**Tallinna Tehnikaülikooli Sertifitseerimisasutus.** (31.01.2013). „Hinnang klaasplastsarruse füüsikalise-mehaaniliste omaduste katsetulemuste kohta“, Tallinn, Eesti.

Thermoplastics vs thermosetting plastics. [on-line]

<http://www.recycledplastic.com/index.html%3Fp=10288.html> (16.04.2018).

**Timma, Tõnu.** 2016. Klaaskiudsarruse nakketugevuse määramine väljatõmbekatsega: Magistritöö. Eesti Maaülikooli metsandus- ja maaehitusinstituut. Tartu. 55 lk.

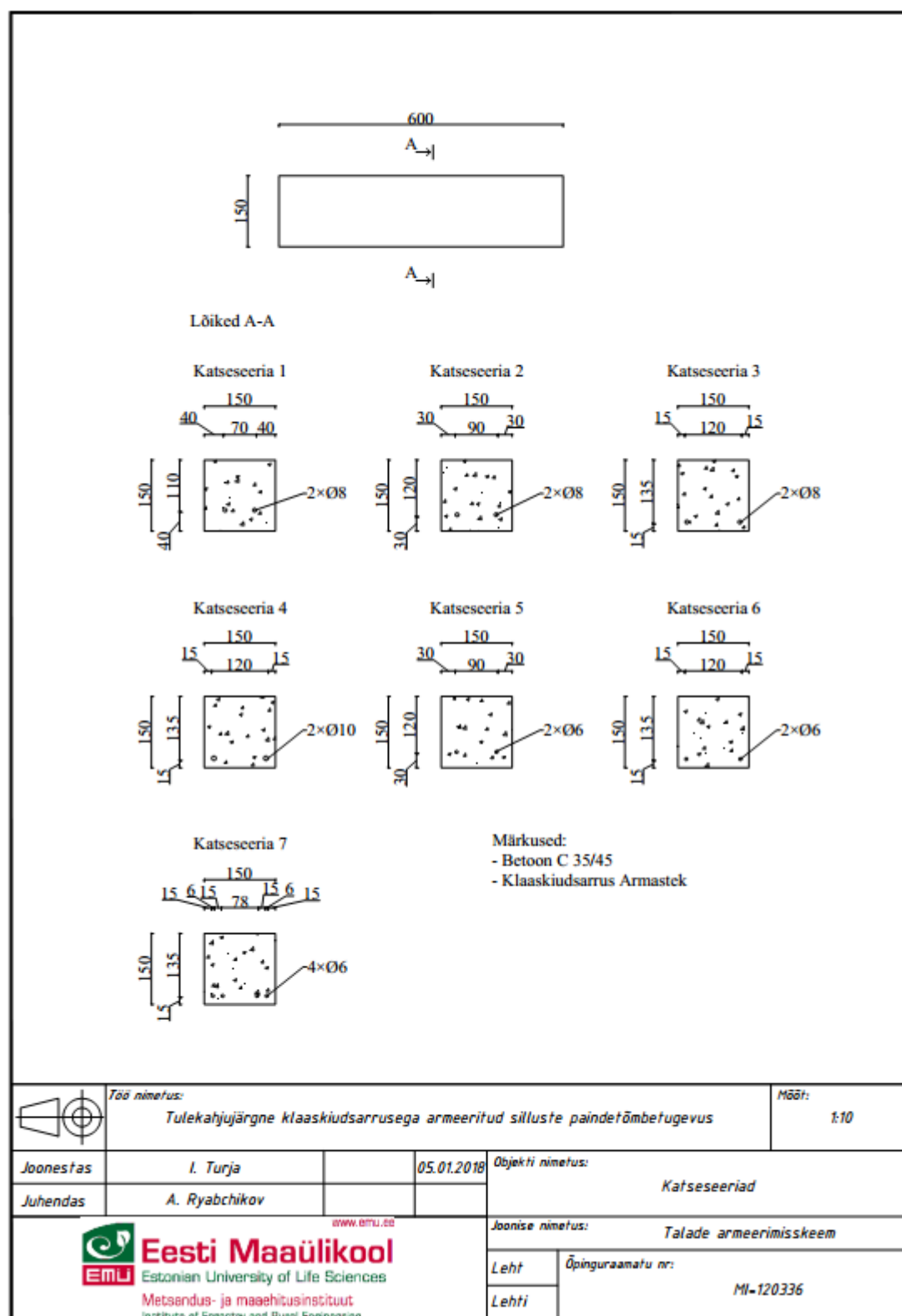
**Tuakta C.** (2005). Use of fiber reinforced polymer composite in bridge structures. Massachusetts: Institute of Technology. 50 lk.

Valmistustehnoloogia. [on-line]

[http://www.tut.ee/public/m/Mehaanikateaduskond/Instituudid/Materjalitehnika\\_instituut/MX\\_X0050/Valmistustehnoloogia\\_080210.pdf](http://www.tut.ee/public/m/Mehaanikateaduskond/Instituudid/Materjalitehnika_instituut/MX_X0050/Valmistustehnoloogia_080210.pdf) (10.05.2018)

**LISAD**

## Lisa 1. Katseseeriad



## Lisa 2. Katsekehade valmistamine ja hoiustamine





a) katsekehade rakis ja sarruste paigaldus, b) rakise täitmine pooleldi sarruste paika sättimiseks, c) valminud katsekehad, d) katsekehade hoiustamine vees, e) katsekehade kuivamine



**Lisa 3.** Katsekehade mõõtmised

Katsekeha tähis	Valmistamise kuupäev	Katsekeha mõõtmised mm			Keskmised mõõtmised mm			Kaal kg
		Kõrgus	Laius	Pikkus	Kõrgus	Laius	Pikkus	
1-1	9.01.2018	150,0	147,3	600,0	149,9	147,1	600,0	30,94
		149,0	147,2	600,0				
		150,6	146,9	600,0				
1-2	9.01.2018	150,7	148,0	600,0	150,1	147,8	600,0	31,03
		149,7	147,8	600,0				
		149,7	147,5	600,0				
1-3	9.01.2018	150,8	147,1	600,1	151,0	146,7	600,0	31,04
		151,1	146,4	600,0				
		151,0	146,6	600,0				
1-4	9.01.2018	150,7	147,3	600,2	150,7	147,4	600,1	31,18
		151,0	147,2	600,0				
		150,3	147,7	600,0				
1-5	9.01.2018	150,8	149,5	600,1	150,4	149,2	600,0	31,41
		149,8	149,0	600,0				
		150,7	149,2	600,0				
2-1	9.01.2018	151,3	150,2	600,2	151,5	150,4	600,1	32
		151,5	150,5	600,1				
		151,7	150,6	600,1				
2-2	9.01.2018	151,7	150,0	600,2	151,7	149,9	600,1	31,85
		151,8	149,7	600,0				
		151,7	150,1	600,0				
2-3	9.01.2018	152,3	150,0	600,2	152,5	149,8	600,1	31,94
		152,4	149,5	600,1				
		152,7	150,0	600,0				
2-4	9.01.2018	15,6	150,5	600,2	107,2	150,5	600,1	32,29
		153,2	150,3	600,0				
		152,7	150,7	600,0				
2-5	9.01.2018	151,6	150,1	600,0	151,5	150,4	600,0	31,88
		151,8	150,5	600,0				
		151,2	150,5	600,0				
3-1	10.01.2018	151,3	150,0	600,0	151,2	150,2	600,0	32
		151,1	150,3	600,0				
		151,3	150,3	600,0				
3-2	10.01.2018	150,7	150,2	600,0	151,3	150,2	600,0	31,98
		151,9	150,2	600,0				
		151,2	150,2	600,0				
3-3	10.01.2018	151,5	149,2	600,0	151,1	149,1	600,0	31,57
		151,0	149,0	600,0				
		150,9	149,2	600,0				

**Lisa 3 järg**

Katsekeha tähis	Valmistamise kuupäev	Katsekeha mõõtmed mm			Keskmised mõõtmed mm			Kaal kg
		Kõrgus	Laius	Pikkus	Kõrgus	Laius	Pikkus	
3-4	10.01.2018	151,0	150,9	600,0	151,3	150,4	600,0	31,91
		151,3	150,3	600,0				
		151,6	150,1	600,0				
3-5	10.01.2018	151,1	150,8	600,0	151,5	150,6	600,0	32,22
		151,8	150,5	600,0				
		151,5	150,5	600,0				
4-1	10.01.2018	150,7	149,8	600,0	150,2	149,4	600,0	31,61
		150,1	149,1	600,0				
		149,6	149,3	600,0				
4-2	10.01.2018	150,5	147,5	600,1	150,1	147,7	600,0	31,34
		150,0	147,4	600,0				
		149,9	148,2	600,0				
4-3	10.01.2018	150,4	147,1	600,1	150,7	146,7	600,0	31,22
		150,7	146,3	600,0				
		150,9	146,7	600,0				
4-4	10.01.2018	151,3	148,0	600,0	150,4	147,8	600,0	31,31
		150,2	147,8	600,0				
		149,9	147,7	600,0				
4-5	10.01.2018	150,7	146,6	600,0	150,6	147,1	600,0	31,18
		150,7	147,4	600,0				
		150,5	147,2	600,0				
5-1	11.01.2018	150,2	149,0	600,0	149,4	149,1	600,0	31,5
		149,3	148,7	600,0				
		148,7	149,6	600,0				
5-2	11.01.2018	149,9	147,7	600,0	150,1	147,7	600,0	31,46
		150,4	147,4	600,1				
		149,9	148,0	600,0				
5-3	11.01.2018	150,1	146,9	600,0	150,8	146,9	600,0	31,56
		151,0	146,2	600,0				
		151,3	147,7	600,0				
5-4	11.01.2018	150,1	147,9	600,0	150,9	148,5	600,0	31,79
		150,8	148,5	600,0				
		151,8	149,3	600,0				
5-5	11.01.2018	150,4	147,3	600,0	150,5	147,5	600,0	31,46
		150,9	147,5	600,0				
		150,3	147,6	600,0				
6-1	11.01.2018	149,7	150,3	600,2	150,5	150,2	600,1	31,88
		150,6	149,7	600,0				
		151,2	150,5	600,2				

### Lisa 3 järg

Katsekeha tähis	Valmistamise kuupäev	Katsekeha mõõtmised mm			Keskmised mõõtmised mm			Kaal kg
		Kõrgus	Laius	Pikkus	Kõrgus	Laius	Pikkus	
6-2	11.01.2018	150,3	150,1	600,2	150,7	150,3	600,1	31,95
		150,8	150,4	600,0				
		150,9	150,3	600,0				
6-3	11.01.2018	150,6	149,2	600,1	150,9	149,6	600,0	31,98
		151,2	149,8	600,0				
		150,9	149,9	600,0				
6-4	11.01.2018	150,9	150,2	600,1	150,9	150,1	600,0	32,07
		150,9	150,1	600,0				
		150,8	150,0	600,0				
6-5	11.01.2018	151,3	150,0	600,0	150,9	149,9	600,0	31,84
		151,1	149,6	600,0				
		150,4	150,0	600,0				
7-1	12.01.2018	152,7	150,0	600,0	152,4	150,5	600,0	32,43
		152,7	150,6	600,0				
		151,8	150,8	600,0				
7-2	12.01.2018	152,7	150,1	600,0	152,7	150,2	600,0	32,45
		152,2	150,2	600,0				
		153,2	150,2	600,0				
7-3	12.01.2018	151,8	150,1	600,0	152,2	149,3	600,0	32,04
		152,5	148,7	600,0				
		152,2	149,1	600,0				
7-4	12.01.2018	152,1	149,8	600,0	152,5	149,8	600,0	32,24
		152,9	149,8	600,0				
		152,4	149,8	600,0				
7-5	12.01.2018	151,9	150,7	600,0	151,0	150,8	600,0	32,3
		150,1	150,9	600,0				
		151,1	150,9	600,0				

**Lisa 4.** Valmistamise etappide, katsetamiste kuupäevad ja kuumutamiskatse tulemused

Katsekeha tähis	Valmistamise kuupäev	Vette panemise kuupäev	Veest väljavõtmise kuupäev	Maksimaalne pinnatemperatuur °C	Kuumutamise kuupäev	Purustamise kuupäev
1-1	9.01.2018	10.01.2018	16.02.2018	388,2	13.03.2018	21.03.2018
1-2	9.01.2018	10.01.2018	16.02.2018	424,1	12.03.2018	21.03.2018
1-3	9.01.2018	10.01.2018	16.02.2018	412,7	13.03.2018	21.03.2018
1-4	9.01.2018	10.01.2018	16.02.2018	428,1	12.03.2018	21.03.2018
1-5	9.01.2018	10.01.2018	16.02.2018	381,6	13.03.2018	21.03.2018
2-1	9.01.2018	10.01.2018	16.02.2018	428	14.03.2018	21.03.2018
2-2	9.01.2018	10.01.2018	16.02.2018	464,6	14.03.2018	21.03.2018
2-3	9.01.2018	10.01.2018	16.02.2018	409,8	14.03.2018	21.03.2018
2-4	9.01.2018	10.01.2018	16.02.2018	384,9	14.03.2018	21.03.2018
2-5	9.01.2018	10.01.2018	16.02.2018	423,7	14.03.2018	21.03.2018
3-1	10.01.2018	11.01.2018	16.02.2018	371,7	14.03.2018	22.03.2018
3-2	10.01.2018	11.01.2018	16.02.2018	394,5	14.03.2018	22.03.2018
3-3	10.01.2018	11.01.2018	16.02.2018	381,7	14.03.2018	22.03.2018
3-4	10.01.2018	11.01.2018	16.02.2018	352,5	14.03.2018	22.03.2018
3-5	10.01.2018	11.01.2018	16.02.2018	407,3	14.03.2018	22.03.2018
4-1	10.01.2018	11.01.2018	16.02.2018	462,8	13.03.2018	22.03.2018
4-2	10.01.2018	11.01.2018	16.02.2018	450,7	13.03.2018	22.03.2018
4-3	10.01.2018	11.01.2018	16.02.2018	458,7	13.03.2018	22.03.2018
4-4	10.01.2018	11.01.2018	16.02.2018	435,1	13.03.2018	22.03.2018
4-5	10.01.2018	11.01.2018	16.02.2018	384,1	13.03.2018	22.03.2018
5-1	11.01.2018	12.01.2018	16.02.2018	372,1	12.03.2018	22.03.2018
5-2	11.01.2018	12.01.2018	16.02.2018	400,1	12.03.2018	22.03.2018
5-3	11.01.2018	12.01.2018	16.02.2018	447,5	12.03.2018	22.03.2018
5-4	11.01.2018	12.01.2018	16.02.2018	453	12.03.2018	22.03.2018
5-5	11.01.2018	12.01.2018	16.02.2018	392,1	12.03.2018	22.03.2018
6-1	11.01.2018	12.01.2018	16.02.2018	413,3	14.03.2018	22.03.2018
6-2	11.01.2018	12.01.2018	16.02.2018	425,8	14.03.2018	22.03.2018
6-3	11.01.2018	12.01.2018	16.02.2018	442,3	14.03.2018	23.03.2018
6-4	11.01.2018	12.01.2018	16.02.2018	400,4	14.03.2018	23.03.2018
6-5	11.01.2018	12.01.2018	16.02.2018	425,8	14.03.2018	23.03.2018
7-1	12.01.2018	15.01.2018	16.02.2018	457,1	13.03.2018	23.03.2018
7-2	12.01.2018	15.01.2018	16.02.2018	441,2	13.03.2018	23.03.2018
7-3	12.01.2018	15.01.2018	16.02.2018	465,5	13.03.2018	23.03.2018
7-4	12.01.2018	15.01.2018	16.02.2018	463,5	13.03.2018	23.03.2018
7-5	12.01.2018	15.01.2018	16.02.2018	367,5	13.03.2018	23.03.2018

**Lisa 5.** Peamised esinenud purunemispildid



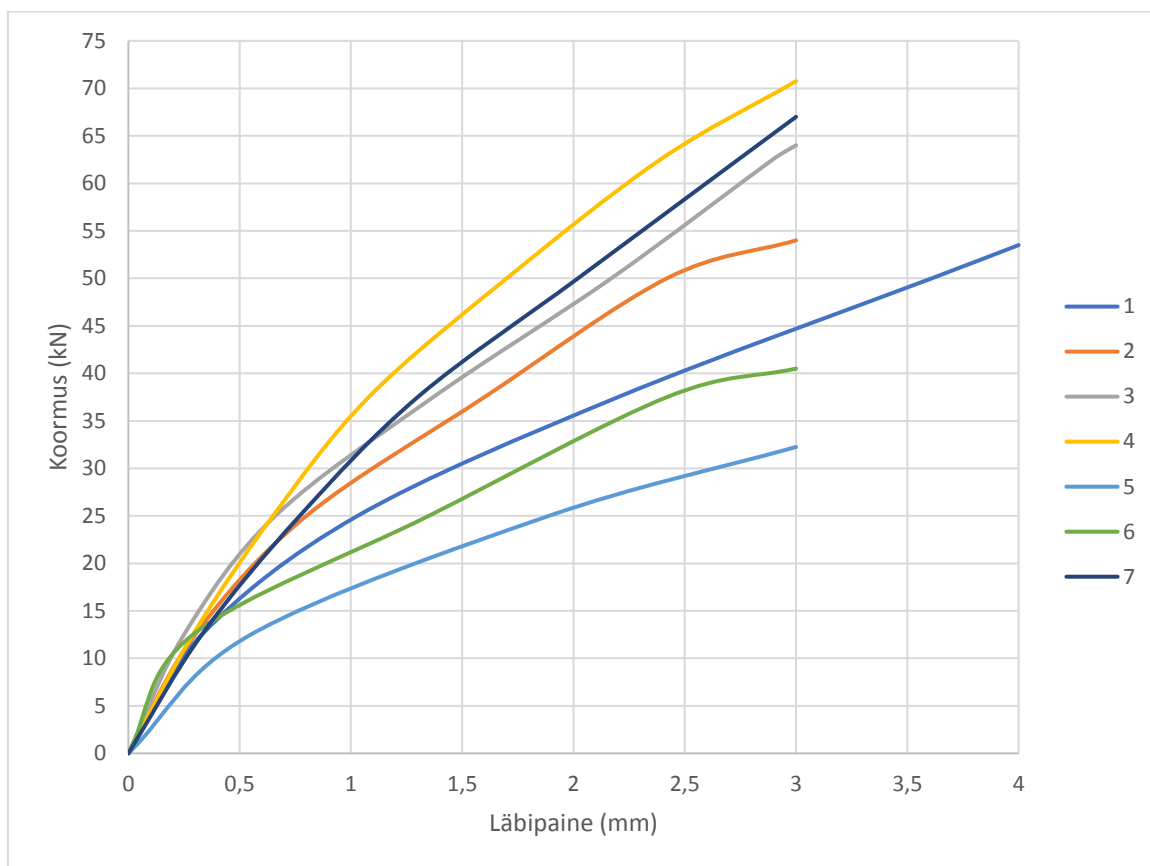
**Lisa 6.** Kuumutatud katsekehade katseprotokollid

Katsekeha tähis	Purustav jõud kN	Paindetõmbetugevus MPa	Jõud lubatud läbipaindel kN	Paindetõmbetugevus lubatud läbipaindel MPa	Märkused
1-1	90	12,5	23,75	3,3	läbipaindeni 4 mm
1-2	75	10,3	22,5	3,1	läbipaindeni 4 mm
1-3	106,25	14,7	20	2,8	läbipaindeni 4 mm
1-4	77,5	10,7	21,25	2,9	läbipaindeni 4 mm
1-5	82,5	11,1	25	3,4	läbipaindeni 4 mm
2-1	83,75	11,0	25	3,3	
2-2	91,25	12,0	28,75	3,8	
2-3	93,75	12,3	28,75	3,8	
2-4	87,5	16,2	26,25	4,9	
2-5	97,5	12,8	27,5	3,6	
3-1	106,25	14,0	31,25	4,1	
3-2	93,75	12,4	28,75	3,8	
3-3	93,75	12,6	32,5	4,4	
3-4	93,75	12,3	30	3,9	
3-5	92,5	12,1	28,75	3,8	
4-1	73,75	9,9	30	4,0	
4-2	77,5	10,7	36,25	5,0	
4-3	70	9,7	31,25	4,3	
4-4	96,25	13,2	32,5	4,4	
4-5	62,5	8,6	35	4,8	purunes läbipaindel 2,54mm
5-1	58,75	8,0	15	2,0	
5-2	57,5	7,9	18,75	2,6	
5-3	52,5	7,3	20	2,8	
5-4	96,25	13,0	18,75	2,5	
5-5	53,75	7,4	16,25	2,2	
6-1	83,75	11,1	25	3,3	
6-2	96,25	12,7	18,75	2,5	
6-3	95	12,7	18,75	2,5	
6-4	76,25	10,1	21,25	2,8	
6-5	62,5	8,3	21,25	2,8	
7-1	123,75	16,1	30	3,9	
7-2	130	17,0	31,25	4,1	
7-3	108,75	14,4	27,5	3,6	
7-4	115	15,1	27,5	3,6	
7-5	115	15,1	27,5	3,6	

**Lisa 7.** Kuumutamata katsekehade katseprotokollid

Katsekeha tähis	Purustav jõud kN	Paindetõmbetugevus MPa	Jõud lubatud läbipaindel kN	Paindetõmbetugevus lubatud läbipaindel MPa	Märkused
1-1	76,25	10,1	32,5	4,3	läbipaindeni 4 mm
1-2	106,25	13,8	41,3	5,4	läbipaindeni 4 mm
1-3	88,75	11,6	40,0	5,2	läbipaindeni 4 mm
1-4	140,00	18,1	36,3	4,7	läbipaindeni 4 mm
1-5	113,75	14,9	40,0	5,2	läbipaindeni 4 mm
2-1	78,75	10,4	40,0	5,3	läbipaindeni 4 mm
2-2	66,25	8,6	37,5	4,8	läbipaindeni 4 mm
2-3	146,25	18,5	37,5	4,7	
2-4	148,75	19,5	36,3	4,8	
2-5	130,00	17,0	37,5	4,9	
3-1	101,25	12,9	35,0	4,5	
3-2	76,25	9,9	43,8	5,7	
3-3	75,00	9,7	36,3	4,7	
3-4	98,75	12,6	41,3	5,3	
3-5	76,25	9,8	38,8	5,0	
4-1	107,50	13,9	53,8	6,9	
4-2	90,00	11,6	43,8	5,7	
4-3	82,50	10,6	43,8	5,6	
4-4	91,25	12,1	46,3	6,1	
4-5	62,50	8,1	41,3	5,4	
5-1	73,75	9,6	28,8	3,8	
5-2	66,25	8,6	31,3	4,1	
5-3	70,00	9,2	32,5	4,3	
5-4	58,75	7,7	35,0	4,6	
5-5	67,50	8,7	33,8	4,4	
6-1	83,75	10,8	33,8	4,4	
6-2	65,00	8,4	30,0	3,9	
6-3	72,50	9,4	37,5	4,8	
6-4	72,50	9,3	30,0	3,9	
6-5	65,00	8,4	38,8	5,0	
7-1	138,75	17,9	50,0	6,4	
7-2	127,50	16,6	52,5	6,8	
7-3	126,25	16,5	41,3	5,4	
7-4	87,50	11,5	46,3	6,1	
7-5	108,75	14,2	40,0	5,2	

**Lisa 8.** Katseseeriade paindediagrammid





**Lisa 9.** Esimese katseseeria purunemise ja läbipainde T-Test

t-Test: Two-Sample Assuming Equal Variances

	<i>Variable 1</i>	<i>Variable 2</i>
Mean	11,85116398	13,69584
Variance	3,260904347	9,624613
Observations	5	5
Pooled Variance	6,442758757	
Hypothesized Mean Difference	0	
df	8	
	-	
t Stat	1,149087324	
P(T<=t) one-tail	0,141856589	
t Critical one-tail	1,859548038	
P(T<=t) two-tail	0,283713179	
t Critical two-tail	2,306004135	

t-Test: Two-Sample Assuming Equal Variances

	<i>Variable 1</i>	<i>Variable 2</i>
Mean	3,087838	4,961463
Variance	0,061345	0,211518
Observations	5	5
Pooled Variance	0,136431	
Hypothesized Mean Difference	0	
df	8	
t Stat	-8,02039	
P(T<=t) one-tail	2,14E-05	
t Critical one-tail	1,859548	
P(T<=t) two-tail	4,29E-05	
t Critical two-tail	2,306004	

**Lisa 10.** Teise katseseeria purunemise ja läbipainde T-Test

t-Test: Two-Sample Assuming Equal Variances

	<i>Variable 1</i>	<i>Variable 2</i>
Mean	12,87773019	14,79748
Variance	3,940067418	24,74968
Observations	5	5
Pooled Variance	14,3448743	
Hypothesized Mean Difference	0	
df	8	
t Stat	0,801431613	
P(T<=t) one-tail	0,223015346	
t Critical one-tail	1,859548038	
P(T<=t) two-tail	0,446030693	
t Critical two-tail	2,306004135	

t-Test: Two-Sample Assuming Unequal Variances

	<i>Variable 1</i>	<i>Variable 2</i>
Mean	3,866788	4,907387
Variance	0,355303	0,049077
Observations	5	5
Hypothesized Mean Difference	0	
df	5	
t Stat	-3,65909	
P(T<=t) one-tail	0,007304	
t Critical one-tail	2,015048	
P(T<=t) two-tail	0,014609	
t Critical two-tail	2,570582	

**Lisa 11.** Kolmanda katseseeria purunemise ja läbipainde T-Test

t-Test: Two-Sample Assuming Equal Variances

	<i>Variable 1</i>	<i>Variable 2</i>
Mean	12,67423688	10,97731
Variance	0,585257605	2,668614
Observations	5	5
Pooled Variance	1,626936009	
Hypothesized Mean Difference	0	
df	8	
t Stat	2,103523713	
P(T<=t) one-tail	0,034280336	
t Critical one-tail	1,859548038	
P(T<=t) two-tail	0,068560673	
t Critical two-tail	2,306004135	

t-Test: Two-Sample Assuming Equal Variances

	<i>Variable 1</i>	<i>Variable 2</i>
Mean	3,994917	5,011378
Variance	0,059906	0,216711
Observations	5	5
Pooled Variance	0,138308	
Hypothesized Mean Difference	0	
df	8	
t Stat	-4,32152	
P(T<=t) one-tail	0,00127	
t Critical one-tail	1,859548	
P(T<=t) two-tail	0,002541	
t Critical two-tail	2,306004	

**Lisa 12.** Neljanda katseseeria purunemise ja läbipainde T-Test

t-Test: Two-Sample Assuming Equal Variances

	<i>Variable 1</i>	<i>Variable 2</i>
Mean	10,41395665	11,26982
Variance	2,903762098	4,502062
Observations	5	5
Pooled Variance	3,702911923	
Hypothesized Mean Difference	0	
df	8	
t Stat	0,703240386	
P(T<=t) one-tail	0,250927742	
t Critical one-tail	1,859548038	
P(T<=t) two-tail	0,501855485	
t Critical two-tail	2,306004135	

t-Test: Two-Sample Assuming Equal Variances

	<i>Variable 1</i>	<i>Variable 2</i>
Mean	4,52542	5,943291
Variance	0,148207	0,389238
Observations	5	5
Pooled Variance	0,268722	
Hypothesized Mean Difference	0	
df	8	
t Stat	-4,32469	
P(T<=t) one-tail	0,001265	
t Critical one-tail	1,859548	
P(T<=t) two-tail	0,00253	
t Critical two-tail	2,306004	

**Lisa 13.** Viienda katseseeria purunemise ja läbipainde T-Test

t-Test: Two-Sample Assuming Unequal Variances

	<i>Variable 1</i>	<i>Variable 2</i>
Mean	8,703061659	8,763875
Variance	5,886457386	0,546339
Observations	5	5
Hypothesized Mean Difference	0	
df	5	-
t Stat	0,053614591	
P(T<=t) one-tail	0,479659235	
t Critical one-tail	2,015048373	
P(T<=t) two-tail	0,95931847	
t Critical two-tail	2,570581836	

t-Test: Two-Sample Assuming Equal Variances

	<i>Variable 1</i>	<i>Variable 2</i>
Mean	2,428245	4,201826
Variance	0,085121	0,093596
Observations	5	5
Pooled Variance	0,089359	
Hypothesized Mean Difference	0	
df	8	
t Stat	-9,38108	
P(T<=t) one-tail	6,82E-06	
t Critical one-tail	1,859548	
P(T<=t) two-tail	1,36E-05	
t Critical two-tail	2,306004	

**Lisa 14.** Kuuenda katseseeria purunemise ja läbipainde T-Test

t-Test: Two-Sample Assuming Equal Variances

	<i>Variable 1</i>	<i>Variable 2</i>
Mean	10,97763018	9,24398
Variance	3,470199286	0,997485
Observations	5	5
Pooled Variance	2,23384197	
Hypothesized Mean Difference	0	
df	8	
t Stat	1,834024774	
P(T<=t) one-tail	0,051996843	
t Critical one-tail	1,859548038	
P(T<=t) two-tail	0,103993686	
t Critical two-tail	2,306004135	

t-Test: Two-Sample Assuming Equal Variances

	<i>Variable 1</i>	<i>Variable 2</i>
Mean	2,785633	4,380268
Variance	0,114535	0,279202
Observations	5	5
Pooled Variance	0,196869	
Hypothesized Mean Difference	0	
df	8	
t Stat	-5,68254	
P(T<=t) one-tail	0,000232	
t Critical one-tail	1,859548	
P(T<=t) two-tail	0,000464	
t Critical two-tail	2,306004	

**Lisa 15.** Seitsmenda katseseeria purunemise ja läbipainde T-Test

t-Test: Two-Sample Assuming Equal Variances

	<i>Variable 1</i>	<i>Variable 2</i>
Mean	15,5491105	15,33444
Variance	1,019513097	6,482413
Observations	5	5
Pooled Variance	3,750963184	
Hypothesized Mean Difference	0	
df	8	
t Stat	0,175258535	
P(T<=t) one-tail	0,43261555	
t Critical one-tail	1,859548038	
P(T<=t) two-tail	0,8652311	
t Critical two-tail	2,306004135	

t-Test: Two-Sample Assuming Unequal Variances

	<i>Variable 1</i>	<i>Variable 2</i>
Mean	3,772825	5,992652
Variance	0,046137	0,476684
Observations	5	5
Hypothesized Mean Difference	0	
df	5	
t Stat	-6,8648	
P(T<=t) one-tail	0,000501	
t Critical one-tail	2,015048	
P(T<=t) two-tail	0,001003	
t Critical two-tail	2,570582	

**Lisa 16. Lihtlitsents lõputöö salvestamiseks ja üldsusele kättesaadavaks tegemiseks ning juhendaja kinnitus lõputöö kaitsmisele lubamise kohta**

Mina, Ivar Turja,

sünniaeg 22.08.1993,

1. annan Eesti Maaülikoolile tasuta loa (lihtlitsentsi) enda koostatud lõputöö  
**Klaasplastsarrusega betoontalade paindetõmbetugevuse tulekahjujärgne uurimine,**

mille juhendaja on Alexander Ryabchikov,

- 1.1. salvestamiseks säilitamise eesmärgil,
- 1.2. digiarhiivi DSpace lisamiseks ja
- 1.3. veebikeskkonnas üldsusele kättesaadavaks tegemiseks kuni autoriõiguse kehtivuse tähtaja lõppemiseni;
2. olen teadlik, et punktis 1 nimetatud õigused jäävad alles ka autorile;
3. kinnitan, et lihtlitsentsi andmisega ei rikuta teiste isikute intellektuaalomandi ega isikuandmete kaitse seadusest tulenevaid õigusi.

Lõputöö autor \_\_\_\_\_  
(allkiri)

Tartu, 24.05.2018

---

**Juhendaja kinnitus lõputöö kaitsmisele lubamise kohta**

Luban lõputöö kaitsmisele.

Alexander Ryabchikov \_\_\_\_\_  
(juhendaja nimi ja allkiri)

24.05.2018